

**Уважаемый пользователь!**

Обращаем ваше внимание, что система Антиплагиат отвечает на вопрос, является ли тот или иной фрагмент текста заимствованным или нет. Ответ на вопрос, является ли заимствованный фрагмент именно плагиатом, а не законной цитатой, система оставляет на ваше усмотрение. Также важно отметить, что система находит источник заимствования, но не определяет, является ли он первоисточником.

**Уважаемый пользователь!**

Появление этого сообщения говорит о том, что нужно внимательнее отнестись к оценке данного документа. Документ содержит признаки, типичные для искусственного завышения процента оригинальности за счет особенностей форматов документов. Что делать: в первую очередь сравнить текст, содержащийся в отчете и в документе, отправленном на проверку. Если, например, в отчете есть текст, не видимый в исходном документе, или слова «склеены» или в слова вставлены посторонние буквы, это означает, что систему и вас пытались обмануть. В то же время, появление данного знака НЕ ОБЯЗАТЕЛЬНО свидетельствует от том, что попытка обмана была. Возможно, текст содержит слишком много иностранных или очень длинных или не найденных в словаре слов. Это часто встречается в работах, где используется много терминов (химия, юриспруденция и т.п.). В заголовке отчета дана информация, по какому критерию показан знак. НЕЛЬЗЯ ОРИЕНТИРОВАТЬСЯ ТОЛЬКО НА ПРОЦЕНТЫ И ПОЯВЛЕНИЕ ДАННОГО ЗНАКА, необходимо открывать отчет и внимательно просматривать его!

**Информация о документе:**

**Имя исходного файла:** Диссертация Кулаков v8.pdf

**Имя компании:** ТУСУР

**Тип документа:** Прочее

**Имя документа:** Диссертация Кулаков v8.pdf

**Дата проверки:** 18.07.2017 10:54

**Модули поиска:** Интернет (Антиплагиат), Диссертации и авторефераты РГБ, Модуль поиска ЭБС "Лань", Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика, Университетская библиотека онлайн, Коллекция юридических документов, Цитирования

**Текстовые статистики:**

**Индекс читаемости:** сложный

**Неизвестные слова:** в пределах нормы

**Макс. длина слова:** в пределах нормы

**Большие слова:** выше нормы!

<input checked="" type="checkbox"/>	Источник	Ссылка на источник	Коллекция/ модуль поиска	Доля в отчёте	Доля в тексте
<input checked="" type="checkbox"/>	[1] <a href="#">Диссертация</a>	<a href="http://www.spiiras.nw.ru/dissovet/wp-content/uploads/2015/03...">http://www.spiiras.nw.ru/dissovet/wp-content/uploads/2015/03...</a>	Интернет (Антиплагиат)	4,79%	4,79%
<input checked="" type="checkbox"/>	[2] <a href="#">Диссертация (14/14)</a>	<a href="http://www.spiiras.nw.ru/DissSovet/Templates/Abstracts/Pavlo...">http://www.spiiras.nw.ru/DissSovet/Templates/Abstracts/Pavlo...</a>	Интернет (Антиплагиат)	0,03%	1,67%
<input checked="" type="checkbox"/>	[3] <a href="#">Автореферат</a>	<a href="http://www.spiiras.nw.ru/dissovet/wp-content/uploads/2015/03...">http://www.spiiras.nw.ru/dissovet/wp-content/uploads/2015/03...</a>	Интернет (Антиплагиат)	0,15%	1,55%
<input checked="" type="checkbox"/>	[4] <a href="#">Модели и методы план...</a>	<a href="http://tekhnosfera.com/modeli-i-metody-planirovaniya-rekonfi...">http://tekhnosfera.com/modeli-i-metody-planirovaniya-rekonfi...</a>	Интернет (Антиплагиат)	0%	1,54%
<input checked="" type="checkbox"/>	[5] <a href="#">Потрясаев, Семен Але...</a>	<a href="http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004500000/rsl01004500...">http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004500000/rsl01004500...</a>	Диссертации и авторефераты РГБ	0,32%	1,22%
<input checked="" type="checkbox"/>	[6] <a href="#">Полная версия</a>	<a href="http://www.ssau.ru/files/editions/vestnik/vestnik2008_2.pdf">http://www.ssau.ru/files/editions/vestnik/vestnik2008_2.pdf</a>	Интернет (Антиплагиат)	1,03%	1,06%
<input checked="" type="checkbox"/>	[7] <a href="#">Диссертация (13/14)</a>	<a href="http://www.spiiras.nw.ru/DissSovet/Templates/Abstracts/Pavlo...">http://www.spiiras.nw.ru/DissSovet/Templates/Abstracts/Pavlo...</a>	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,86%
<input checked="" type="checkbox"/>	[8] <a href="#">Скачать этот файл PD...</a>	<a href="http://proceedings.spiiras.nw.ru/ojs/index.php/sp/article/do...">http://proceedings.spiiras.nw.ru/ojs/index.php/sp/article/do...</a>	Интернет (Антиплагиат)	0,03%	0,86%
<input checked="" type="checkbox"/>	[9] <a href="#">Концепция автономног...</a>	<a href="http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2009/2009_3_16...">http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2009/2009_3_16...</a>	Интернет (Антиплагиат)	0,34%	0,81%
<input checked="" type="checkbox"/>	[10] <a href="#">http://izv-tn.tti.sf...</a>	<a href="http://izv-tn.tti.sfedu.ru/wp-content/uploads/PDF/2015_1(162...">http://izv-tn.tti.sfedu.ru/wp-content/uploads/PDF/2015_1(162...</a>	Интернет (Антиплагиат)	0,54%	0,74%
<input checked="" type="checkbox"/>	[11] <a href="#">Диссертация (8/14)</a>	<a href="http://www.spiiras.nw.ru/DissSovet/Templates/Abstracts/Pavlo...">http://www.spiiras.nw.ru/DissSovet/Templates/Abstracts/Pavlo...</a>	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,69%
<input checked="" type="checkbox"/>	[12] <a href="#">Скачать этот файл PD...</a>	<a href="http://proceedings.spiiras.nw.ru/ojs/index.php/sp/article/do...">http://proceedings.spiiras.nw.ru/ojs/index.php/sp/article/do...</a>	Интернет (Антиплагиат)	0,6%	0,67%
<input checked="" type="checkbox"/>	[13] <a href="#">Скачать этот файл PD...</a>	<a href="http://proceedings.spiiras.nw.ru/ojs/index.php/sp/article/do...">http://proceedings.spiiras.nw.ru/ojs/index.php/sp/article/do...</a>	Интернет (Антиплагиат)	0,42%	0,66%
<input checked="" type="checkbox"/>	[14] <a href="#">Евдокимов, Владимир ...</a>	<a href="http://dlib.rsl.ru/rsl01006000000/rsl01006770000/rsl01006770...">http://dlib.rsl.ru/rsl01006000000/rsl01006770000/rsl01006770...</a>	Диссертации и авторефераты РГБ	0,24%	0,63%
<input checked="" type="checkbox"/>	[15] <a href="#">Гусарова, Наталия Фе...</a>	<a href="http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004802000/rsl01004802...">http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004802000/rsl01004802...</a>	Диссертации и	0,11%	0,62%

			авторефераты РГБ		
✓ [16]	<a href="#">Скворцов, Михаил Сер...</a>	<a href="http://dlib.rsl.ru/rsl01005000000/rsl01005105000/rsl01005105...">http://dlib.rsl.ru/rsl01005000000/rsl01005105000/rsl01005105...</a>	Диссертации и авторефераты РГБ	0,26%	0,6%
✓ [17]	<a href="#">Лаборатория информац...</a>	<a href="http://netess.ru/3knigi/1102434-1-laboratoriya-informacionni...">http://netess.ru/3knigi/1102434-1-laboratoriya-informacionni...</a>	Интернет (Антиплагиат)	0,12%	0,56%
✓ [18]	<a href="#">Павлов А.Н., Сорокин...</a>	<a href="http://simulation.su/uploads/files/default/immod-2009-2-199-...">http://simulation.su/uploads/files/default/immod-2009-2-199-...</a>	Интернет (Антиплагиат)	0,07%	0,41%
✓ [19]	<a href="#">Десятов, Андрей Дмит...</a>	<a href="http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004729000/rsl01004729...">http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004729000/rsl01004729...</a>	Диссертации и авторефераты РГБ	0,03%	0,36%
✓ [20]	<a href="#">87490</a>	<a href="http://e.lanbook.com/journal/issue.php?p_f_journal=2109&amp;p_f_...">http://e.lanbook.com/journal/issue.php?p_f_journal=2109&amp;p_f_...</a>	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0,01%	0,35%
✓ [21]	<a href="#">Шабалин, Николай Гри...</a>	<a href="http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002637000/rsl01002637...">http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002637000/rsl01002637...</a>	Диссертации и авторефераты РГБ	0,34%	0,34%
✓ [22]	<a href="#">Богатырев, Владимир ...</a>	<a href="http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002300000/rsl01002300...">http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002300000/rsl01002300...</a>	Диссертации и авторефераты РГБ	0,15%	0,33%
✓ [23]	<a href="#">Иванов, Владимир Вик...</a>	<a href="http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002743000/rsl01002743...">http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002743000/rsl01002743...</a>	Диссертации и авторефераты РГБ	0,01%	0,33%
✓ [24]	<a href="#">Методы расчета и обе...</a>	<a href="http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=9166">http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=9166</a>	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0,08%	0,32%
✓ [25]	<a href="#">Волков, Василий Анат...</a>	<a href="http://dlib.rsl.ru/rsl01003000000/rsl01003316000/rsl01003316...">http://dlib.rsl.ru/rsl01003000000/rsl01003316000/rsl01003316...</a>	Диссертации и авторефераты РГБ	0,07%	0,32%
✓ [26]	<a href="#">Мушовец, Константин ...</a>	<a href="http://dlib.rsl.ru/rsl01006000000/rsl01006632000/rsl01006632...">http://dlib.rsl.ru/rsl01006000000/rsl01006632000/rsl01006632...</a>	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,28%
✓ [27]	<a href="http://journals.ssau...">http://journals.ssau...</a>	<a href="http://journals.ssau.ru/index.php/vestnik/issue/download/51/...">http://journals.ssau.ru/index.php/vestnik/issue/download/51/...</a>	Интернет (Антиплагиат)	0,13%	0,28%
✓ [28]	<a href="#">49086</a>	<a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=49086">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=49086</a>	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,27%
✓ [29]	<a href="#">Научно-методические ...</a>	<a href="http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=19055">http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=19055</a>	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0,02%	0,26%
✓ [30]	<a href="#">Новожилов, Андрей Ал...</a>	<a href="http://dlib.rsl.ru/rsl01005000000/rsl01005390000/rsl01005390...">http://dlib.rsl.ru/rsl01005000000/rsl01005390000/rsl01005390...</a>	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,26%
✓ [31]	<a href="#">2034</a>	<a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=2034">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=2034</a>	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,24%
✓ [32]	<a href="#">Багаева, Татьяна Але...</a>	<a href="http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004405000/rsl01004405...">http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004405000/rsl01004405...</a>	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,23%
✓ [33]	<a href="#">3474.Теория надежнос...</a>	<a href="http://www.docme.ru/doc/1367355/3474.teoriya-nadezhnosti-uch...">http://www.docme.ru/doc/1367355/3474.teoriya-nadezhnosti-uch...</a>	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,22%
✓ [34]	<a href="#">Основы устройства и ...</a>	<a href="http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=8768">http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=8768</a>	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,2%
✓ [35]	<a href="#">Репин, Сергей Василь...</a>	<a href="http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004295000/rsl01004295...">http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004295000/rsl01004295...</a>	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,2%
✓ [36]	<a href="#">PDF</a>	<a href="http://proceedings.spiiras.nw.ru/ojs/index.php/sp/issue/down...">http://proceedings.spiiras.nw.ru/ojs/index.php/sp/issue/down...</a>	Интернет (Антиплагиат)	0,06%	0,18%
✓ [37]	<a href="#">...</a>	<a href="http://moluch.ru/conf/tech/archive/124/7039/">http://moluch.ru/conf/tech/archive/124/7039/</a>	Интернет (Антиплагиат)	0,18%	0,18%
✓ [38]	<a href="#">231576</a>	<a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=231576">http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=231576</a>	Университетская библиотека онлайн	0%	0,18%
✓ [39]	<a href="#">275244</a>	<a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=275244">http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=275244</a>	Университетская библиотека онлайн	0,06%	0,18%
✓ [40]	<a href="#">63224</a>	<a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=63224">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=63224</a>	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,18%
✓ [41]	<a href="#">Гусаров, Александр А...</a>	<a href="http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004056000/rsl01004056...">http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004056000/rsl01004056...</a>	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,17%
✓ [42]	<a href="#">Колесенков, Александ...</a>	<a href="http://dlib.rsl.ru/rsl01005000000/rsl01005428000/rsl01005428...">http://dlib.rsl.ru/rsl01005000000/rsl01005428000/rsl01005428...</a>	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,17%
✓ [43]	<a href="#">Шабает, Руслан Рафик...</a>	<a href="http://dlib.rsl.ru/rsl01003000000/rsl01003409000/rsl01003409...">http://dlib.rsl.ru/rsl01003000000/rsl01003409000/rsl01003409...</a>	Диссертации и авторефераты РГБ	0,01%	0,15%
✓ [44]	<a href="#">154147</a>	<a href="http://e.lanbook.com/journal/issue.php?p_f_journal=2355&amp;p_f_...">http://e.lanbook.com/journal/issue.php?p_f_journal=2355&amp;p_f_...</a>	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,13%
✓ [45]	<a href="#">Справочник инженера ...</a>	<a href="http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=16782">http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=16782</a>	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0,05%	0,11%
✓ [46]	<a href="#">65111</a>	<a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=65111">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=65111</a>	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,11%
✓ [47]	<a href="#">Теория надежности сл...</a>	<a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=68415">http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=68415</a>	Университетская	0%	0,11%

			Библиотека онлайн		
✓ [48]	<a href="#">72227</a>	<a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=72227">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=72227</a>	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,11%
✓ [49]	<a href="#">59517</a>	<a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=59517">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=59517</a>	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,11%
✓ [50]	<a href="#">Жигастова, Ольга Кон...</a>	<a href="http://dlib.rsl.ru/rsl01005000000/rsl01005409000/rsl01005409...">http://dlib.rsl.ru/rsl01005000000/rsl01005409000/rsl01005409...</a>	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,1%
✓ [51]	<a href="#">Матюшин, Максим Миха...</a>	<a href="http://dlib.rsl.ru/rsl01005000000/rsl01005097000/rsl01005097...">http://dlib.rsl.ru/rsl01005000000/rsl01005097000/rsl01005097...</a>	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,09%
✓ [52]	<a href="#">Современные технолог...</a>	<a href="http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=19294">http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=19294</a>	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0,03%	0,09%
✓ [53]	<a href="#">УМКД «</a>	<a href="http://www.enu.kz/downloads/materials/umkd.pdf">http://www.enu.kz/downloads/materials/umkd.pdf</a>	Интернет (Антиплагиат)	0,04%	0,09%
✓ [54]	<a href="#">ОБ УТВЕРЖДЕНИИ МЕТОД...</a>	<a href="http://online.lexpro.ru/document/109052">http://online.lexpro.ru/document/109052</a>	Коллекция юридических документов	0,03%	0,08%
✓ [55]	<a href="#">Основы научной работ...</a>	<a href="http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=17228">http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=17228</a>	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0,08%	0,08%
✓ [56]	<a href="#">221203</a>	<a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=221203">http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=221203</a>	Университетская библиотека онлайн	0%	0,08%
✓ [57]	<a href="#">Труды Всероссийской ...</a>	<a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=83036">http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=83036</a>	Университетская библиотека онлайн	0,08%	0,08%
✓ [58]	<a href="#">49093</a>	<a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=49093">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=49093</a>	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,08%
✓ [59]	<a href="#">50289</a>	<a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=50289">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=50289</a>	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0,06%	0,06%
✓ [60]	<a href="#">59420</a>	<a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=59420">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=59420</a>	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,06%
✓ [61]	<a href="#">Структурное моделиро...</a>	<a href="http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=19615">http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=19615</a>	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,06%
✓ [62]	<a href="#">49077</a>	<a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=49077">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=49077</a>	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,06%
✓ [63]	<a href="#">Полная версия</a>	<a href="http://www.ssau.ru/files/editions/vestnik/vestnik2010_2.pdf">http://www.ssau.ru/files/editions/vestnik/vestnik2010_2.pdf</a>	Интернет (Антиплагиат)	0,03%	0,05%
✓ [64]	<a href="#">Комплексная безопасн...</a>	<a href="http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=20762">http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=20762</a>	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,05%
✓ [65]	<a href="#">Бессонов, Роман Вале...</a>	<a href="http://dlib.rsl.ru/rsl01003000000/rsl01003417000/rsl01003417...">http://dlib.rsl.ru/rsl01003000000/rsl01003417000/rsl01003417...</a>	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,05%
✓ [66]	<a href="#">Микрин, Евгений Анат...</a>	<a href="http://dlib.rsl.ru/rsl01000000000/rsl01000344000/rsl01000344...">http://dlib.rsl.ru/rsl01000000000/rsl01000344000/rsl01000344...</a>	Диссертации и авторефераты РГБ	0,02%	0,05%
✓ [67]	<a href="#">Конструирование узло...</a>	<a href="http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=12238">http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=12238</a>	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,04%
✓ [68]	<a href="#">42192</a>	<a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=42192">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=42192</a>	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,04%
✓ [69]	<a href="#">13386</a>	<a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=13386">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=13386</a>	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,04%
✓ [70]	<a href="#">Научно-технический в...</a>	<a href="http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=17606">http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=17606</a>	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,04%
✓ [71]	<a href="#">225107</a>	<a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=225107">http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=225107</a>	Университетская библиотека онлайн	0%	0,04%
✓ [72]	<a href="#">Источник 72</a>		Цитирования	0,03%	0,03%
✓ [73]	<a href="#">9552</a>	<a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=9552">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=9552</a>	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,03%
✓ [74]	<a href="#">Баллистика и наведен...</a>	<a href="http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=18739">http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=18739</a>	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0,03%	0,03%
✓ [75]	<a href="#">234138</a>	<a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=234138">http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=234138</a>	Университетская библиотека онлайн	0%	0,01%
✓ [76]	<a href="#">62631</a>	<a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=62631">http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=62631</a>	Университетская библиотека онлайн	0%	0,01%

Оригинальные блоки: 89,29%

Заимствованные блоки: 10,64%

Заимствование из "белых" источников: 0,06%

Итоговая оценка оригинальности: **89,36%**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

[10] Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации

Российской академии наук

На правах рукописи

[5]

Кулаков Александр Юрьевич

МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ РЕКОНФИГУРАЦИИ СИСТЕМЫ

УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

05.13.01

Системный анализ, управление и обработка информации

Диссертация на соискание [1] учёной степени

кандидат [23] технических наук

Научный [14] руководитель

[23] доктор технических наук [14] доцент

[23]

Павлов Александр Николаевич

Санкт-Петербург – 2017

2

Содержание

Введение .....	4
Раздел 1 Анализ современного состояния исследований в области управления структурной динамикой СТО. Содержательное и формализованное описание задачи реконфигурации СУД КА .....	13
1.1 Анализ современного состояния исследований в области управления структурной динамикой СТО .....	13
1.2 КА как сложный технический объект с перестраиваемой структурой. Особенности управления бортовыми системами КА .....	26
1.3 Содержательное описание процесса реконфигурации СУД КА.....	37
1.4 Разработка теоретико-множественной модели процесса реконфигурации СУД КА .....	47
Выводы .....	52
Раздел 2. Аналитическая модель реконфигурации СУД КА.....	54
2.1 Логико-вероятностный подход к описанию структуры СУД. Основные структурные показатели .....	54
2.2 Формализованное описание структуры СУД КА .....	60
2.2.1 Состав системы управления движением [12] .....	60
2.2.2 Подсистема чувствительных элементов СУД [12] .....	61
2.2.3 Подсистема исполнительных органов СУД .....	68
2.3 Аналитическая модель структурно-функциональной реконфигурации СУД в рамках текущего режима ориентации .....	74
Выводы .....	77
Раздел 3. Методика структурно-функциональной реконфигурации и алгоритмы решения задачи выбора рабочей конфигурации БА СУД .....	78
3.1 Стандартная реконфигурация СУД КА .....	78
3.2 Методика структурно-функциональной реконфигурации СУД КА .....	86
3.3 Алгоритмы решения задачи выбора рабочей конфигурации БА.....	88
3.3.1 Общий подход к решению задачи выбора рабочей конфигурации БА ..	88
3.3.2 Эвристический подход на основе «жадного» алгоритма .....	91
3.3.3 Бионический подход на основе алгоритма случайного направленного поиска .....	92
3.3.4 Комбинированный подход на основе «жадного» алгоритма .....	94
3	
Выводы .....	95
Раздел 4 Разработка и исследование прототипа программного комплекса моделирования реконфигурации СУД КА .....	97
4. 1 Структурно-логическая схема проводимых исследований прототипа программного комплекса.....	97
4. 2 Комплекс моделей, описывающих функционирование КА.....	100
4.2.1 Модель орбитального движения КА.....	100
4.2.2 Модель взаимодействия с НКУ и условия работы целевой аппаратуры	102
4.2.3 Имитационная модель работы БА СУД.....	103
4.2.4 Исходные данные для проведения моделирования функционирования КА .....	106

4.3 Прототип программного комплекса для моделирования функционирования КА .....	106
4.4 Иллюстрация работы алгоритмов выбора рабочей конфигурации БА 109	
4.5 Проведение экспериментов с помощью ПК «Реконфигурация». Оценка эффективности функционирования КА.....	116
4.5.1 Описание модельных условий функционирования КА .....	116
4.5.2 Моделирование функционирования КА при стандартной реконфигурации СУД .....	118
4.5.3 Моделирование функционирования КА при структурнофункциональной реконфигурации СУД .....	122
4.5.5 Дополнительные эксперименты и анализ полученных результатов ....	129
Выводы .....	134
Заключение .....	136
Список сокращений и условных обозначений .....	139
Литература.....	142

4

Введение

В современных

условиях для обеспечения требуемой степени

автономности, качества и оперативности управления [10]

состоянием такого

сложного технического объекта (СТО) как космический аппарат (КА) и его бортовой аппаратуры (БА)

необходимо решить следующие основные научнотехнические проблемы. Во-первых, обеспечить модельно-алгоритмическое

описание процессов смысловой интерпретации всех возможных штатных и нештатных состояний их функционирования и, во-вторых, на этой основе решить основные задачи комплексной автоматизации и интеллектуализации процессов мониторинга [10]

технического состояния и управления БА КА в

различных условиях обстановки. В подавляющем большинстве случаев на практике мониторинг, прогнозирование и управление состояниями [10]

элементов, подсистем и всей БА с точки зрения обеспечения требуемых уровней показателей надежности, живучести и эффективности функционирования КА

автоматизирован, в лучшем случае, лишь частично.

Как правило, в современных [10]

системах мониторинга технического состояния и управления БА КА

операторам представляется смысловая информация

только о состояниях их элементов, а не объектов контроля в целом.

Указанные обстоятельства приводят к тому, что интегральную оценку и прогнозирование состояния БА КА, также как и формирование необходимых управляющих воздействий выполняют операторы, в основном, вручную, базируясь на тех или иных эвристических правилах.

[10]

Особую актуальность вопросы автономности и живучести приобретают при разработке и эксплуатации сложных технических объектов космического назначения с определённой спецификой, например, космические аппараты наблюдения. Для КА наблюдения (дистанционного зондирования Земли) является важной оперативность как передачи программы наблюдения на борт КА, так и получения целевой информации и телеметрии на наземные средства, а также возможность оперативного вмешательства в случае возникновения нештатной ситуации. С другой стороны, из-за особенностей

5

орбит, на которых функционируют КА наблюдения, становится затруднительным обеспечение эффективного управления с точки зрения оперативности информационно-управляющего взаимодействия бортового комплекса управления (БКУ) КА и наземных средств АСУ. Таким образом, для КА наблюдения вопросы автономности и живучести тесно взаимосвязаны с вопросом эффективного функционирования.

Проблема повышение уровня автономности, живучести, эффективности функционирования сложных технических объектов в научной литературе рассматривается в совокупности с решением задач организации технического диагностирования состояния системы, проведение

реконфигурации структур системы (структурной, функциональной, структурно-функциональной реконфигурации), управление резервами, альтернативное и многорежимное управление, анализ и синтез отказоустойчивости и катастрофоустойчивости технической системы. С единой системно-кибернетической позиции к вопросу обеспечения надёжности, живучести, катастрофоустойчивости и отказоустойчивости сложных технических объектов подходит развиваемая в настоящее время теория управления структурной динамикой. В рамках данной теории широкое распространение получил такой вариант управления в сложных системах как реконфигурация структуры [57, 80, 81].  
Под реконфигурацией структуры сложного технического объекта

понимается целенаправленный процесс изменения структуры (структур) объекта в целях сохранения, восстановления, а в некоторых ситуациях и повышения уровней [1]

надёжности, живучести, эффективности применения,

либо обеспечения минимального их снижения при возможной деградации и/или выходе из строя элементов и подсистем [1]

[10, 12, 13, 25, 26, 57].

Предварительный анализ рассматриваемых подходов к повышению уровня живучести и автономности проектируемых систем с перестраиваемой структурой, а также повышению эффективности их функционирования при помощи реконфигурации структуры объекта, показал, что в рамках

6 применения современных методов управления структурной динамикой к техническим объектам космического назначения

эти вопросы, как отдельный

предмет научных изысканий, с единой общесистемной точки зрения [1]

были

недостаточно затронуты и исследованы.

В рамках работ Кирилина А.Н., Ахметова Р.Н., Соллогуба А.В., Макарова В.П. [3, 4, 5, 6, 7, 34, 35] подробно рассматривается процесс функционирования КА наблюдения при возникновении аномальных ситуаций. При этом особое внимание уделено основным принципам построения бортовой системы управления живучестью КА в аномальных ситуациях (АС), диагностике возникновения АС, методам восстановления штатного функционирования КА. Предложен комплексный инструментарий (программные и аппаратные средства контроля, контур «аварийной» защиты, использование структурных и функциональных резервов, дежурные режимы функционирования) для технологии полётного реинжиниринга КА наблюдения на основе базы знаний об АС для обеспечения оперативного управления бортовыми ресурсами. Следует отметить, что в указанных работах не рассматривался вопрос автоматизации управления структурной динамикой на борту КА, а также влияние структурного управления на показатели эффективности функционирования КА.

Говоря в целом о задачах управления структурно-сложными объектами наиболее значимые результаты в исследовании свойств надёжности, безопасности, живучести объектов, а также в исследовании вопросов структурного управления были получены большим количеством отдельных авторов и авторских коллективов, соответствующих научных школ [25, 26, 74, 68, 50, 51, 52, 49, 57, 59, 60, 63, 66, 80, 81, 82]. Данные авторы выполнили значительный объём научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также написали ряд монографий и учебных пособий, посвящённых

вопросам разработки методологических и методических основ исследования свойств структурно-сложных объектов и [1]

организации контура структурного управлению объектами. Прежде всего,

7 для рассматриваемых в диссертации вопросов важным является упомянуть следующие научные коллективы и отдельных авторов: Рябинина И.А.

(логико-вероятностное исчисление), Можяева А.С. (общий логиковероятностный метод), Волика Б.Г., Буянова Б.Б., Лубкова Н.В. (анализ и синтез

структур управляющих систем), Ахметова Р.Н., Макарова В.П., Соллогуба А.В., Кирилина А.Н. (система управления живучестью космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, [1]

технология

реконфигурации БКУ КА), Соколова Б.В., Охтилева М.Ю., Юсупова Р.М., Павлова А.Н. (проактивное управление структурной динамикой сложных объектов, структурно-функциональная реконфигурация), Додонова А.Г. (функциональная и структурная живучесть информационных систем), Бородакия Ю.В., Тарасова А.А. (функциональная реконфигурация).

Таким образом, можно подчеркнуть особую актуальность рассмотрения вопросов структурного управления в целях повышения автономности, живучести и эффективности функционирования СТО. При этом важными задачами становятся:

автоматическое проведение реконфигурации СТО с перестраиваемой структурой;

рациональное перераспределение бортовых ресурсов в случае реконфигурации СТО и, что особенно важно, при нештатном функционировании СТО.

Для процесса управления КА характерно его деление на четыре вида (контура) [30, 57, 80, 84]: управление бортовыми ресурсами, управление взаимодействием, управление бортовой аппаратурой (средствами) и управление движением. При этом все виды управления взаимосвязаны и обусловлены текущим состоянием объекта. Особо стоит отметить тесную взаимосвязь управления движением, управления бортовой аппаратурой и бортовым ресурсом в рамках одной системы КА, бортовой системы управления движением. Говоря о структурном управлении на борту КА в качестве технической и функциональной структуры КА в данной работе

8

рассматривается контур управления угловым движением (контур координатно-параметрического управления, в более общем смысле). Тогда под реконфигурацией на борту КА, как видом структурного управления понимается процесс изменения структур контура управления угловым движением (в рамках системы управления движением) КА, а именно выбор рабочей конфигурации БА и режима ориентации СУД.

В качестве объекта диссертационного исследования рассмотрен процесс функционирования КА, как сложного технического объекта с перестраиваемой структурой.

Предметом исследований является модельно-алгоритмическое обеспечение реконфигурации СУД КА.

Цель диссертационного исследования заключается в разработке модельно-алгоритмического обеспечения реконфигурации СУД КА для оценки эффективности функционирования КА при вариантах реконфигурации СУД, а также для рационального использования бортового ресурса, автоматизации парирования нештатных ситуаций и повышения надёжности функционирования КА при использовании реконфигурации СУД на борту КА.

Для достижения поставленной цели диссертационного исследования следует решить следующие частные задачи:

1. Провести системный анализ процесса управления структурной динамикой, а также рассмотреть основные особенности реализации контура бортового управления на современных КА.
2. Осуществить содержательную и теоретико-множественную постановку задачи реконфигурации СУД КА.
3. Разработать методику и алгоритмы проведения реконфигурации СУД КА для рационального использования ресурса бортовой аппаратуры и парирования нештатных ситуаций, возникающих вследствие неисправности БА.
4. Выполнить программную реализацию разработанной модели,

9

методики и алгоритмов в виде прототипа программного комплекса для проведения экспериментов, подтверждающих конструктивность и практическую значимость предложенного программно-алгоритмического обеспечения проведения реконфигурации СУД КА.

В

качестве основных методов исследования рассматриваются: методы системного анализа, [1]

логико-вероятностные методы описания структуры технической систем, методы оптимизации, методы математического моделирования.

Решение сформулированной задачи и

обобщение полученных научных результатов определило следующие основные положения, выносимые на защиту:

- 1) [1]

Модель процесса реконфигурации СУД КА.

2) Алгоритмы решения задачи выбора рабочей конфигурации БА СУД.

3) Методика структурно-функциональной реконфигурации СУД КА.

Научная новизна полученных в диссертационной работе результатов, разработанной модели, алгоритмов и методики, заключается в следующем:

1) Предложено формальное описание модели реконфигурации СУД

КА, в которой, в отличие от известных, данный процесс был представлен как процесс изменения структурных состояний КА за счёт варьирования рабочей конфигурации БА и переключения режимов ориентации КА.

2) Разработаны алгоритмы выбора рабочей конфигурации БА, позволяющие учитывать текущее состояние КА при восстановлении его работоспособности и обоснованно осуществлять выбор наиболее предпочтительных вариантов рабочей конфигурации БА для рационального распределения расхода бортового ресурса.

3) Разработана оригинальная методика реконфигурации СУД КА, позволяющая без привлечения возможностей наземных средств управления КА комплексно и согласованно применять алгоритмы выбора рабочей конфигурации БА СУД, что позволяет увеличить значения частных

10 показателей эффективности КА и комплексные показатели надёжности на 25%, а в некоторых случаях на 50%.

Обоснованность и достоверность научных положений, основных выводов и результатов диссертации обеспечивается анализом [16]

состояний

исследований на сегодняшний день в области управления структурной динамикой сложных систем, а также апробацией основных теоретических положений диссертации в научных статьях и докладах на конференциях, семинарах. Корректность алгоритмов рационального выбора рабочей конфигурации БА на КА и методики реконфигурации СУД на их основе подтверждается согласованностью результатов машинных экспериментов, проведенных с помощью разработанного прототипа программного комплекса (ПК) оценки эффективности применения методики структурной реконфигурации при управлении КА.

Практическая значимость (ценность) диссертационной работы состоит в том, что разработанные содержательная и формальная модели реконфигурации могут послужить основой методического обеспечения для решения важной и актуальной задачи автоматизации управления сложными техническими объектами с перестраиваемой структурой (в частности, КА) с целью повышения автономности и живучести их функционирования. Предложенная постановка задачи реконфигурации бортовой аппаратуры системы управления движением КА, алгоритмы выбора рабочей конфигурации БА, методика проведения реконфигурации СУД являются в достаточной степени универсальными и применимыми не только для аппаратуры СУД и контура управления угловым движением, но и для других бортовых систем КА.

С точки зрения применения информационных технологий для развития космической техники, предложенная методика и алгоритмы могут быть использованы на борту современных КА в программном обеспечении бортовой вычислительной системы.

11

Полученные в диссертации результаты были использованы в трёх организациях. В СПИИРАН в рамках проекта

программы фундаментальных исследований отделения нанотехнологий и информационных технологий ([1]ОНИТ) РАН ([17]Проект № 2.11) «Комплексное моделирование, многокритериальное оценивание и анализ рисков при выработке управленческих решений в катастрофоустойчивой информационной системе», [1]

гранта Российского фонда фундаментальных исследований

(

РФФИ) №11-08-00767-а «[17]Теоретические и экспериментальные исследования процессов реконфигурации структурных состояний катастрофоустойчивых объектов в условиях неопределенности», [1]

СЧ ОКР

«Разработка комплекса методик и программных средств для оценки надежности бортовой аппаратуры маломассогабаритных космических аппаратов при ее проектировании, наземных испытаниях и эксплуатации», СЧ ОКР «Разработка методик и алгоритмического обеспечения системы



комплексного моделирования транспортно-энергетического модуля для расчета и анализа показателей его надежности и живучести». В АО «КБ «Арсенал» при выполнении опытно-конструкторской работы по теме «Экипаж» в рамках разработки алгоритмов парирования нештатных ситуаций средствами бортового комплекса управления (БКУ) (автоматическая реконфигурация при возникновении неисправностей приборов системы управления движением), а также в аванпроекте по теме «Перигей» (многофункциональный малый космический аппарат). В рамках данных работ была повышена сбое-отказоустойчивость системы управления движением и обеспечена высокая живучесть функционирования КА в целом. В Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения (ГУАП) при подготовке специалистов и магистров по направлениям «Информатика и вычислительная техника», «Программная инженерия», «Системный анализ и управление» были внедрены в учебный процесс модель, методика и алгоритмы реконфигурации СУД КА.

12

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования были представлены на всероссийских и отраслевых конференциях ракетно-космической отрасли, а именно: V российская мультikonференция по проблемам управления «Информационные технологии в управлении - 2012» (ИТУ-2012), г. СанктПетербург, 2012 г., VI

Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий», г. Москва, 2013 г., [57]

IV Всероссийская наудотехническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («Козловские чтения-2015»), г. Самара, 2015 г., III, IV, V Молодёжная научно-техническая конференция «Инновационный арсенал молодёжи», г. Санкт-Петербург, 2012-2014 гг.

Публикации. Основные результаты по материалам диссертационной работы опубликованы в 11 печатных трудах [28, 38, 40, 41, 42, 43, 44, 58, 61, 62, 65], из которых три статьи опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ («[16]

Известия ВУЗов. Приборостроение», «Труды СПИИРАН», «Вестник СибГАУ»).

Личный вклад автора в основных публикациях с соавторами кратко характеризуется следующим образом: в [3]

публикации [28] автором описаны разработанные компоненты программного комплекса моделирования функционирования КА; в [42, 40] предложена модель процесса реконфигурации при возникновении сбоев и отказов БА; в [41] рассмотрен алгоритм выбора рабочей конфигурации БА при проведении реконфигурации на борту КА; в [38, 43, 44] представлена методика проведения реконфигурации СУД, исходя из заданного приборного бортовой БА.

Диссертационная работа состоит из введения, [3]четырёх [5]разделов, заключения, списка литературы и [3]двух приложений. Основной текст изложен на 152 листах, содержит 11 таблиц и 31 [5]

рисунок. Список цитируемой литературы включает 90 наименований.

13

Раздел 1 Анализ современного состояния исследований в области управления структурной динамикой СТО. Содержательное и формализованное описание задачи реконфигурации СУД КА

1.1 Анализ современного состояния исследований в области управления структурной динамикой СТО

Одним из важнейших и фундаментальных понятий современной науки является понятие системы. Вся общественная жизнь человека непосредственно связана с различного рода системами: физическими, биологическими, технико-технологическими, социальными и т.д. Систему можно определить [32] как

целостное образование, состоящее из взаимосвязанных (взаимодействующих) компонентов (элементов, частей) и обладающее свойствами, которые не сводятся к свойствам [55]

этих компонент и не выводятся из них. После бурных научно-технических изменений XX века внимание учёных в области системно-кибернетических исследований всё больше акцентируется на сложных системах.

К современным сложным системам можно отнести

автоматизированные системы управления сложными техническими объектами (СТО), территориально-распределённые информационно-вычислительные сети, в том числе состоящие из локальных сетей, гибкие автоматические и автоматизированные производства различной продукции и т.п.

Сложность современных объектов [3] управления проявляется в таких аспектах, как структурная сложность, сложность функционирования, сложность выбора поведения, сложность моделирования и сложность развития.

[1]

Одним из главных аспектов сложной системы является структурная сложность.

Структура системы – [25] характеристика устойчивых связей и 14 способов взаимодействия элементов системы, определяющая её целостность, строение, основы её организации. [18]

Различают следующие типы структур [32]:

-

структура целей, функций и задач;

- организационная структура;

- техническая структура;

- топологическая структура;

- структура [5]

программно-математического и информационного обеспечения;

- структура технологии применения технической системы.

Тесным образом с понятием структуры системы связано понятие состояния системы. В общем случае состояние системы – это

совокупность свойств, признаков (параметров) системы, которые отражают наиболее существенные стороны функционирования системы. [25]

Тогда структурное

состояние сложной системы – это совокупность текущих состояний элементов, входящих в заданную структуру сложных технических объектов (СТО), и состояние

отношений между ними.

Для успешного решения на практике возложенных на СТО задач необходимо, чтобы данные объекты были управляемы, т.е. способны изменять (перестраивать) свою структуру (структуры), состояния, параметры, способы функционирования в различных условиях обстановки.

[1]

Процесс эксплуатации большинства СТО, обусловлен постоянной сменой структурных состояний. Смена состояний СТО вызвана разными причинами: объективными и субъективными, внутренними и внешними (например, возмущениями, вызванными взаимодействием со средой или реализацией управляющих воздействий). Так в работах [31, 49] различают структурные, параметрические и координатные возмущения и в соответствии с ними структурное, координатное и параметрическое управление (иногда говорят о системах координатно-параметрического управления [24]).

Смену структурных состояний СТО будем называть его структурной динамикой, а процесс формирования и реализации воздействий,

15

обеспечивающих переход СТО из текущего в заданное структурное состояние – управлением структурной динамикой СТО [57].

В качестве наглядной модели структурной динамики рассмотрим граф эволюции работоспособности сложного технического объекта [57].

S

2

(и)

) (

) (

и

N

и

S S

1

(и)

Накопление отклонений  
Компенсация отклонений

S  
12  
(p)  
) (  
1  
p  
S  
S  
11  
(p)  
S  
2  
(p)  
) (  
) (  
2  
) (  
1  
p  
N N  
p p  
S S  
1  
(p)  
S  
12  
(o)  
) (  
1  
o  
S  
S  
11  
(o)  
S  
2  
(o)  
S  
1  
(o)  
S  
L

Восстановление работоспособности

Снижение работоспособности

Рисунок 1.1 Граф [\[1\]](#)

эволюционной работоспособности СТО

В результате своего функционирования СТО находится в том или ином многоструктурном макросостоянии. Причем помимо динамики структур, таким макросостояниям присуще взаимное влияние этих структур друг на друга при главенствующей роли технологических или функциональных структур [57]. Многоструктурное макросостояние СТО – это обобщённое состояние

системы, характеризующее текущее [\[14\]](#) состояние основных элементов, подсистем, структур СТО и отношений между ними. [\[1\]](#)

Вершины

графа – это многоструктурные макросостояния СТО. Всё множество вершин графа можно условно разбить на четыре класса.

16

Первый класс полностью работоспособных макросостояний СТО.

Элементы данного

класса отличаются друг от друга уровнем накопленных

отклонений N в [\[1\]](#)

системе, но обобщённая оценка функционирования системы может характеризоваться как штатная.

Второй класс частично работоспособных макросостояний. С увеличением накопленных отклонений (индекс  $i$ ) на определённом уровне (индекс  $j$ ) частичной работоспособности (не достигая пока критического уровня) СТО переходит на уровень ниже ( $j-1$  уровень), характеризующийся большим отклонением основных параметров функционирования от штатных (номинальных, определённых документацией) и большим количеством отказавших структурных элементов.

Третий класс неработоспособных макросостояний СТО. Система в таких состояниях уже не способна эффективно выполнять возложенные на неё на этапе разработки и описанные в рабочей документации функции. Эксплуатация СТО продолжается для предотвращения аварийных ситуаций и перевода её в макросостояние, в котором она могла бы работать по целевому назначению.

Четвёртый класс – это класс аварийных макросостояний. Класс предельных состояний, в которых неработоспособно большинство структурных элементов, а дальнейшая эксплуатация СТО представляет опасность для человека или приносит вред экологии. Управление СТО в таких макросостояниях затруднено или невозможно.

В модели эволюции работоспособности важное значение имеет понятие отказа. Выделяют:

простые отказы – отказы, которые сопровождаются потерей работоспособности только непосредственно отказавших элементов; аварийные отказы – отказы, которые сопровождаются потерей работоспособности не только непосредственно отказавших элементов, но и других элементов, технологически связанных с отказавшим;

17

цепные отказы – простые или аварийные отказы, сопровождающиеся дополнительными потерями в объектах потребителей из-за ухудшения качества или (и) снижения производительности рассматриваемого объекта. В качестве дуг графа выступают переходы между макросостояниями СТО, характеризующие структурную динамику в сложной системе. Процесс деградации (Д-процесс) системы, показан дугами направленными сверху вниз. Процесс восстановления (В-процесс) – дугами снизу вверх. Процесс накопления отклонений (Н-процесс) – дугами слева на право, дуги справа налево – это процесс компенсации (К-процесс).

Таким образом, модель эволюции позволяет сформулировать такую важную цель структурного управления, как непрерывное обеспечение максимально возможного уровня работоспособности СТО (и её элементов).

Для реализации этой цели в контуре структурного управления должно осуществляться: воздействие на Д-процессы (для исключения или уменьшения вероятности перехода в наименее желательное макросостояние), воздействие на В-процессы (организации восстановления) и К-процессы (компенсации накопленных отклонений).

Таким образом, для осуществления управления структурной динамикой СТО должен быть организован контур структурного управления (рисунок 1.2). В связи с разнотипностью структур сложных систем для реализации контура структурного управления необходимо несколько систем управления (СУ).

Контур структурного управления может выполнять следующие функции:

функция технической диагностики (обеспечивающая функция, не участвующая непосредственно в структурном управлении); функция реконфигурации структуры (Д-, В-, К-процессы); функция аварийной защиты (защита от перехода СТО в аварийные, отказовые макросостояния Д-, Н-процессы в классах неработоспособных и аварийных макросостояний);

18

функция управления резервами (Д-, В-процессы в классах работоспособных и частично работоспособных макросостояний) функция технического обслуживания и функция ремонта (Впроцессы).

) (

к

t и

) (

п

t и

) (t y

) (

) тр (

t x

) (t y

) (t

Функция технического обслуживания и ремонта

Функция резервирования

Функция реконфигурации структуры

Контур координатного и  
 параметрического управления  
 Функция технического  
 диагностирования  
 Контур структурного управления  
 Функция аварийной защиты  
 ОУ  
 ) (  
 с  
 t и

Рисунок 1.2 Контур структурного управления

В комплексе все эти функции образуют контур структурного управления.

Помимо контура структурного управления в СТО различают ещё два контура (вида) управления: координатное и параметрическое. При координатном управлении управляющее воздействие представляет собой изменения входных координат физических процессов в техническом объекте, ограничений области допустимых значений некоторых координат или показателей качества процессов в технической системе. Параметрическое управление направлено на изменение значений физических параметров элементов технической системы [24, 83, 84].

Так в работе [24] описан большой класс СТО называемых системы автоматического управления (САУ) с реконфигурацией. В большинстве

19 примеров САУ с реконфигурацией, понятие структуры ограничивается структурой устройства управления. В качестве основных видов САУ с реконфигурацией рассмотрим систему координатно-параметрического управления (СКПУ) и систему активной управляемой технологии (САУТ). Система координатно-параметрического управления (СКПУ) имеют расширенные ресурсы управления, охватывая кроме традиционно используемых координатных управляющих воздействий, также и параметрические или, в более общем случае, изменяющие оператор преобразования – операторные управляющие воздействия. Проектирование адаптивных СКПУ нестационарными объектами основывается на теории адаптивных систем. Вводится приемлемая эталонная система сравнения и рассматривается её движение относительно «ведущей» координатной системы, алгоритмы координатного и параметрического управления в которой определяется из условия минимизации функционала и удовлетворения условиям устойчивости системы (на основе функций Ляпунова). Методы проектирования бинарных СКПУ основываются на свойствах движения, возникающих в системах с разрывными управлениями и скользящими режимами, как малая чувствительность к малым возмущениям. Для примера, структурная схема бинарной СКПУ представлена на рисунке 1.3, где 1- задатчик режима; 2 – блоки рассогласования; 3 – активный регулятор и блок смешивания управления при реконфигурации; 4 – объект управления; 5 – возмущающие воздействия; 6 – задатчик режима системы сравнения; 7 – дополнительный координатный регулятор основного контура системы; 8, 9 – регуляторы; 10 – задатчик режима системы реконфигурации.

20

Рисунок 1.3 Структурная схема бинарной СКПУ

В системах с активной управляемой технологией (САУТ), известных как «системы с изменяемой конфигурацией объекта или с активным, деформируемым объектом», распределение ресурсов на координатное и параметрическое управление реализуется с помощью СКПУ. Так, например, в механических объектах в системах типа САУТ обычные координатные ресурсы управления (силы и моменты движения) пополняются параметрическими (параметры конструкции), обеспечивается рациональное размещение управляющих органов и приводов, создание новых каналов управления, которые не существовали и не принимались во внимание на начальном этапе при раздельном проектировании конструкции и системы управления. Такие САУТ известны как системы активной механики, также известны САУТ активной оптики и активной радиоэлектроники.

Для СКПУ и САУТ контур координатно-параметрического управления играет основную роль. Потребность в изменении алгоритма управления, а не состояния технических объектов системы является причиной для реконфигурации контура управления. Под контуром управления понимается структура алгоритма управления в техническом объекте. Таким образом, контур структурного управления как бы встроен в основной контур координатно-параметрического управления.

Рассмотрим другой класс систем управления (СУ), где контур структурного управления не зависит от контура координатно-

21

параметрического управления. Этот класс СУ, называемых интегрированными САУ (ИСАУ). В рамках ИСАУ рассматривается СУ

сложными динамическими объектами (летательные и космические аппараты (ЛА, КА)) на основе бортовых цифровых вычислительных систем (БЦВМ) [21, 24, 87]. В отличие от САУ с реконfigurацией и реализации координатно-параметрического управления область исследования контура структурного управления в ИСАУ находится в начальной стадии [57]. Рассмотрим классификацию ИСАУ (рисунок 1.4), предложенную в работе [24].

ИСАУ  
Системы с  
применением  
концепции  
интеллектуального  
управления

Системы  
альтернативного и  
многорежимного  
управления  
Системы  
отказоустойчивого и  
самовосстанавливаемого  
управления  
**[13]**

Рисунок 1.4 Классификация ИСАУ

«Альтернативное управление» в СТО осуществляется при помощи заранее обусловленного конечного множества возможных структур (альтернатив), имеющих свои стратегии управления и, следовательно, конфигурацию системы управления. При этом действие управляющей подсистемы (центрального регулятора, контроллера) характеризуются распознаванием ситуации, восстановлением границ между сложными ситуациями в условиях помех и выбора заранее сформированной программы управления (по её номеру и месту в «банке знаний»).

Системы многорежимного управления по сравнению с «альтернативным управлением» соответствуют более высокому уровню организации функционирования системы. Для указанного класса СТО с управляемой структурной динамикой предполагается декомпозиция

22  
глобальной цели, стоящей перед системой, на множество (или последовательность) локальных целей и разделения многообразия движения системы на ряд режимов, которые выбираются в управляющей подсистеме. В рамках данных систем возможна также одновременная реализация требований многоцелевого и многорежимного управления, что предполагает формирование соответствующих компромиссных решений и согласование процессов управления.

С точки зрения графа эволюции работоспособности управление СТО следует рассматривать только в классе работоспособных (частично работоспособных) состояний, и, как исключение, для «многорежимного управления» возможна реализация функции аварийной защиты, то есть функционирование в предаварийном состоянии.

Системы отказоустойчивого и самовосстанавливаемого управления характеризуются следующими особенностями [24]:

- необходимость быстрого самовосстановления системы при попадании её в аварийный (предаварийный) режим (зону, состояние);
- более жёсткие ограничения на условия неопределённости распознавания ситуаций, когда диагностируется и тестируется лишь часть дефектов;
- необходимость временного резервирования для организации самовосстановления СТО с управляемой структурой;
- парирование нештатных ситуаций, не предусмотренных заранее эксплуатационной документацией [3];
- диагностирование комплексных отказов.

Разработка систем отказоустойчивого и самовосстанавливаемого управления тесно связана с понятием живучести. Под живучестью понимается

способность системы **[39]** выполнять установленный минимальный объём своих функций при внешних воздействиях, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации, противостоять таким воздействиям, осуществлять выбор оптимального режима функционирования, перестройки

23  
структуры, изменения функций отдельных подсистем и их поведения [25].

**[22]**

Причём в работе [3] разграничивается понятие отказоустойчивости и живучести по следующему критерию: если система при отказах сохраняет штатные режимы функционирования, то такая система называется отказоустойчивой, если же допускается невыполнение задач функционирования, приводящих к значительному снижению эффективности системы, для последующего их восстановления в штатные режимы, то говорят о живучести системы.

Большое значение понятие живучести имеет в проектировании вычислительных комплексов и информационных сетей [25, 36, 71]. Специфика такого рассмотрения заключается в том, что подобные СТО состоят из множества однородных многофункциональных элементов (процессоров, контроллеров), что позволяет рассматривать контур структурного управления независимо от координатно-параметрического контура.

Обеспечение свойством живучести такого важного класса СТО как космические аппараты осуществляется при помощи специализированной подсистемы управления живучестью [3], играющей важную роль в повышении автономности функционирования КА. Штатное функционирование КА поддерживается при нормальной работе всех его бортовых систем, которые подвержены влиянию факторов космического пространства (ФКП). Среди ФКП особую актуальность приобретают радиационные факторы:

- естественные радиационные пояса Земли;
- галактические космические лучи
- солнечные космические лучи.

Радиационные факторы приводят как к возникновению периодических событий, связанных с воздействием на электронную аппаратуру КА, так и к деградации характеристик отдельных элементов КА. В современных КА практически все бортовые системы содержат электронные компоненты,

24 которые должны выполнять свои функции в условиях воздействия радиационных факторов. Тем самым в рамках подсистемы управления живучестью необходимо постоянно обеспечивать оперативное восстановление работоспособности бортовых систем КА, а в случае невозможности оперативного восстановления организовать перевод КА в одно из устойчивых состояний.

Также стоит отметить, что для опытных образцов создаваемых СТО (её элементов) неизбежно аппаратно-структурное и аппаратно-функциональное резервирование. Таким образом, присутствие как аппаратной, так и алгоритмически-функциональной избыточности приводит к явной необходимости существования контура структурного управления и реализации специальной подсистемы структурного управления. На сегодняшний день все вышеприведённые примеры сложных технических объектов с контуром структурного управления (с перестраиваемой структурой) можно рассматривать в рамках активно развивающейся теории управления структурной динамикой. В рамках данной теории могут быть предложены и реализованы на различных этапах жизненного цикла СТО

следующие варианты управления структурной динамикой:

- [14]** изменение способов и целей функционирования СТО, их содержания, последовательности выполнения в различных условиях;
- [10]** перераспределение функций, задач и алгоритмов управления между уровнями **[14]**

СТО;  
управление резервами СТО;  
реконфигурация структур СТО;  
перемещение в пространстве отдельных элементов и подсистем СТО.

Под реконфигурацией [10, 12, 13, 25, 26, 57] СТО

понимается

целенаправленный процесс изменения структуры (структур) объекта в целях сохранения, восстановления, а в некоторых ситуациях и повышения уровней

25 надежности и живучести СТО, либо обеспечения минимального их снижения при возможной деградации и/или выходе из строя элементов и подсистем

**[1]**

СТО.

В рамках стандартной технологии реконфигурации (в ряде случаев называемой «слепой» реконфигурацией), наиболее развитого подхода на настоящий момент, при отказах технических средств и нарушении

функционирования СТО в целях сохранения его наиболее приоритетных функций «

жертвуют» другими функциями или частью работоспособных элементов. [1]

При этом, как правило, не реализуется анализ текущего состояния объекта и выполняемых им функций, анализ целевых и информационных возможностей объекта. В данном направлении можно выделить следующих основных представителей Кравец В.Г., Любинский В.Е., Турута Е.Н., Боготарёв В.А., Бородакий Ю.В., Тарасов А.А.

Исходя из недостатков «слепой» реконфигурации предложен иной подход, получивший название структурно-функциональной реконфигурации.

В рамках данного подхода реконфигурация рассматривается

не только как

технология управления структурами для компенсации [19]

последствий отказов и

сбоев, но и как технология управления, направленная на повышение эффективности функционирования СТО в изменяющихся условиях.

Основными представителями подхода структурно-функциональной реконфигурации являются Соколов Б.В., Юсупов Р.М., Охтилев М.Ю., Павлов А.Н.

Современная тенденция повышения вычислительных возможностей «бортовых» средств различных СТО способствуют интеллектуализации алгоритмов управления применяемых в СУ СТО, в частности СУ контуром структурного управления. Существенным недостатком управления структурной динамикой СТО являлась большая роль человека, так как распознавание нештатного функционирования системы или проведение структурно-функционального синтеза – это слабоформализуемая творческая задача. Но с развитием таких направлений в современной науке как

искусственный интеллект, системный анализ, кибернетика и с появлением быстродействующих ЭВМ роль человека, как звена управления в СУ СТО, стала уменьшаться.

1.2 КА как сложный технический объект с перестраиваемой структурой. Особенности управления бортовыми системами КА

Объектом диссертационных исследований является процесс функционирования космического аппарата как сложного технического объекта с перестраиваемой структурой. Космический аппарат является классическим примером сложного объекта управления, состоящий из различных технических объектов, объединённых в подсистемы и системы: датчиков положения, датчиков угловых скоростей, приёмо-передающих модулей разных диапазонов, электромеханических, магнитных исполнительных органов, двигательной установки (или двигательных установок различных типов) и т.д. Для описания управления КА можно воспользоваться универсальной концептуальной моделью активного подвижного объекта (АПО) [30, 57, 80, 84]. Концепция АПО позволяет перейти на другой уровень содержательного и формального описания КА как сложного технического объекта со своей спецификой, независимо от конкретного класса космических аппаратов. Таким образом, с единых позиций можно подойти к описанию функционирования различных по целевому назначению типов космических аппаратов, интерпретируемых как активные подвижные объекты. В рамках данного диссертационного исследования такой подход важен для вопроса, связанного с реконфигурацией, проводимой на борту КА.

Активный подвижный объект – это искусственно созданный материальный объект (система, представляющая аппаратно-программный комплекс), перемещающийся в пространстве и осуществляющий взаимодействие (информационное, энергетическое, вещественное) со средой (взаимодействие I-го рода) или с другими подобными объектами

(взаимодействие II-го рода) [30]. Процесс функционирования АПО состоит из четырёх составляющих:

- перемещение АПО как материального объекта в пространстве;
- изменение состояния аппаратуры, находящейся на борту АПО (бортовой аппаратуры);
- изменение состояния бортового ресурса;
- изменение состояния взаимодействия АПО со средой или другими АПО.

Каждая составляющая формализована в соответствующую абстрактную систему управления, включающую в себя: систему управления движением, систему управления бортовым ресурсом (топливо, энергия, временной ресурс бортовой аппаратуры (БА), память в запоминающем устройстве (ЗУ)), систему управления БА (управление режимами работы



БА), систему управления взаимодействием. В общем случае структура АПО как объекта управления показана на рисунок 1.5.

Основные функции, выполняемые системами управления КА, кратко можно описать следующим образом:

Система управления движением осуществляет управление, как центра масс КА, так и относительно центра масс, а также всевозможных присоединённых подвижных элементов.

Система управления взаимодействием осуществляет управление работой специальной аппаратуры для информационного взаимодействия с окружающей средой, осуществляет взаимодействие КА с наземным сегментом управления, обеспечивает информационное взаимодействие между бортовым комплексом управления (БКУ) и наземным сегментом управления, информационное взаимодействие специальной аппаратуры и внешних потребителей непосредственно или через другие КА. Обеспечивает получение специальной информации от внешней среды (например, о состоянии циклонов в определённой части земной поверхности).

28

Система управления аппаратурой КА осуществляет включение/отключение, изменение режимов работы бортовой аппаратуры, ввод в контур управления резервных комплектов аппаратуры бортовых систем, восстановление работоспособности аппаратуры после сбоев по командам с наземного сегмента или автоматически, диагностика состояния аппаратуры, реконфигурация технической и функциональной структуры БКУ КА.

Система управления ресурсами КА организует распределение выполнимых и невыполнимых ресурсов, поддержание энергобаланса и т.д.

состояние взаимодействия

состояние аппаратуры

состояние движения

состояние ресурса

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

управление

взаимодействием

АППАРАТУРА

Д В И Ж Е Н И Е

Р Е С У Р С

возмущения

возмущения

возмущения

управление

аппаратурой

управление

движением

управление

ресурсом

возмущения

состояние среды или характеристики других АПО

Рисунок 1.5 Обобщённая структурная схема АПО

[13]

Конкретизируем процессы функционирования АПО и сопоставим абстрактным СУ реальные бортовые системы КА. Схематично структура управляющих подсистем КА представлена на рисунок 1.6, на котором приняты следующие сокращения: ССН – система спутниковой навигации, БСКВУ – бортовая синхронизирующее координатно-временное устройство, СИО – система информационного обмена, БА КИС – бортовая аппаратура командно-измерительной системы, БИТС – бортовая информационно-телеметрическая система, БВС – бортовая вычислительная система, БЦВМ –

бортовая цифровая вычислительная машина, БПО – бортовое программное обеспечение, СУД – система управления движением, БА СУД – бортовая

29

аппаратура СУД, СУСмС – система управления смежных систем, СТКРП – система трансляции команд и распределения питания, БУС – блок устройств согласования, СКВР – система контроля и восстановления работоспособности, СЭП – система электропитания, СОТР – система обеспечения терморегулирования, ОДУ – объединённая двигательная установка, ЦА – целевая аппаратура, БКУ – бортовой комплекс управления, БСК – бортовой специальный комплекс, БОК – бортовой обеспечивающий комплекс, НКУ – наземный комплекс управления.

Рисунок 1.6 Структура бортовых систем КА

Управление взаимодействием КА со средой является основным видом управления, другие виды управления – аппаратурой, движением, ресурсом,

являются вспомогательными (обеспечивающими) видами управлением, влияющими на управление взаимодействием. Работа основных комплексов КА распределена:

- БСК отвечает за работу целевой аппаратуры и передачу специальной информации потребителю;
- БКУ осуществляет функции управления КА для создания необходимых условий для работы БСК;

30

- БОК включает в себя вспомогательные системы, обеспечивающие функционирование КА в целом.

Аппаратура, входящая в БСК, может работать в различных режимах [4, 35].

Взаимодействие КА с внешней средой осуществляется на основе:

- взаимодействия ЦА с окружающей физической средой (КА наблюдения, метеорологии, научные КА), либо посредством взаимодействия с другими КА или наземными сегментом космической системы (КА связи, навигации);
- информационного взаимодействия с другими объектами (КАретрансляторы, навигационные КА системы ГЛОНАСС, GPS, наземные потребители информации и т.п.);
- передачи информации (телеметрической информации - ТМИ) о состоянии КА (его систем) на наземный сегмент управления (НКУ);
- приёма команд управления с НКУ.

Реализация вышеизложенных функций на борту КА возложена: на БСК – в части работы ЦА и передачи специальной информации (информации получаемой в результате работы ЦА) потребителю (через НКУ или непосредственно), на СИО – в части взаимодействия с наземным сегментом управления (передача ТМИ, получение команд управления), на ССН – для взаимодействия с КА системы ГЛОНАСС, GPS. Стоит отдельно отметить энергетическое взаимодействие, которое осуществляется через панели солнечных батарей (ПСБ). Данное взаимодействие не связано с управлением КА по целевому назначению, а является обеспечивающим. Для распределения и накопления поступившей посредством ПСБ энергии необходима система электропитания (СЭП). В отличие от приборов и систем БСК, СИО, ССН система электропитания пополняет бортовой ресурс и поддерживает его баланс, то есть выполняет функции управления ресурсом. Управление движением КА реализуется в целях поддержания заданных пространственно-временных условий взаимного материального и

31

информационно-энергетического взаимодействия (контакта) специального бортового комплекса (целевой аппаратуры), и источников информации в интересах успешного решения поставленных перед КА целевых задач [84].

Движение КА может быть разделено на два вида: движение центра масс и движение относительно центра масс. Управление движением центра масс КА осуществляется для решения задач:

- поддержания заданного орбитального положения КА;
- совершения манёвра в целях изменения параметров орбиты (изменение плоскости орбиты, изменение в плоскости орбиты, переход с эллиптической на круговую орбиту или наоборот);
- задачи взаимного маневрирования одного КА относительно другого (задачи ближнего и дальнего наведения);
- маневрирование в целях обеспечения требуемого качества работы целевой аппаратуры и т.д.

Управление движением вокруг центра масс (управление угловым движением) осуществляется для решения задач:

- стабилизации КА (поддержание заданного углового положения);
- прямого и обратного программного поворота;
- поворота одной из осей КА на заданный угол и его удержание;
- гашения угловых скоростей КА (после отделения КА от ракетыносителя или после выхода КА из режима неориентированного полёта) и т.д.

Управление движением КА влияет на расход ресурса (его состояние) посредством затрат рабочего тела для совершения орбитальных манёвров и для различных задач управления угловым движением. Также в процессе управления КА на электромеханических исполнительных органах затрачивается накопленная электроэнергия. Основные функции в реализации управления движением на борту КА осуществляют система управления движением (СУД), объединённая двигательная установка (ОДУ), бортовая вычислительная система (БВС).

32

Одним из основных условий успешной работы целевой аппаратуры КА (то есть его функционирования по назначению) является качественное выполнение задач управления движением. Так для КА наблюдения важными характеристиками являются точность ориентации (определения и удержания углового положения) и стабилизации (поддержания заданного интервала угловой скорости). Для целевого функционирования группировки

близколетящих КА может оказаться важным точность взаимного маневрирования (поддержания определённой дистанции на орбите). Проведём декомпозицию процесса управления ресурсами по следующим видам ресурсов и по соответствующим системам на борту КА:

- управление электроэнергией (за восполнение и поддержание баланса электроэнергии отвечает СЭП, за распределение электроэнергии по приборам – СТРП);

- управление топливным ресурсом (в состав ОДУ, как правило, входят дополнительные подсистемы, управляющие работой ракетных двигателей, например, распределением и подводом топлива);
- управление информационными ресурсами на борту (распределение памяти запоминающих устройств, каналами передачи/приёма информации).

Таким образом, система управления бортовым ресурсом на КА представляет из себя совокупность систем и подсистем (СЭП, СТРП, подсистемы ОДУ), обеспечивающих распределение и поддержание баланса восполнимых (электроэнергия) и распределение невозполнимых видов ресурсов (компонентов топлива, сжатого и сжиженного газа, специальных видов ресурса типа носителей информации и т.п.) между потребителями (бортовой аппаратурой КА).

В задачи СУБА входит управление аппаратурой КА при различных условиях, как при штатном функционировании КА, так и в аномальных (нештатных), предаварийных и аварийных ситуациях.

СУБА состоит из комплекса программных и аппаратных средств, обеспечивающих управление БА КА. В качестве аппаратных средств СУБА 33

можно назвать цифровые или аналоговые приборы, осуществляющие управление системами КА. Систему трансляции команд и распределения питания (СТРП) можно назвать подсистемой СУБА. Вместе с тем к СУБА можно отнести блок устройств согласования работой двигательной установки. В целом, подобные подсистемы и приборы можно объединить в систему управления смежными системами (СУСМС). Кроме того, система контроля, диагностики технического состояния и восстановления работоспособности является неотъемлемой частью СУБА [9, 75, 76].

Основными функциями СУБА являются:

- включение, изменение режимов работы, отключение основных и резервных комплектов БА систем КА;
- восстановление работоспособности автоматически (из БВС), либо по командам с НКУ.

В дополнение к обозначенным в концепции АПО функциям перечислим ещё несколько функций, без реализации которых невозможно говорить об автономности функционирования современных КА:

- структурная и функциональная реконфигурация БА КА;
  - диагностика состояний БА и определение причины неисправности до функционального элемента;
  - управление КА в аномальных (нештатных) и аварийных ситуациях.
- Важную роль в управлении БА КА занимает

система управления

живучестью (СУЖ). Концепция построения СУЖ [9]

базируется на следующих принципах [35]:

1)

структура СУЖ формируется на основе принципа [9] физического и программного комплексирования БА, предназначенных для решения функциональных задач КА и его [6] БС, включая БКУ;

2) разработка встроенных в [9]

программное обеспечение бортовых систем специализированных программных модулей, решающих задачи в интересах СУЖ.

34

В работе [4, 35] СУЖ представляется трёхуровневой иерархической системой, программно реализуемой

всей совокупностью бортовых вычислительных средств.

Нижний уровень [9]

СУЖ – это микропроцессоры, встраиваемые непосредственно в БА, которые, помимо

решения функциональных задач, обеспечивают автоматический мониторинг их состояния на основе информации, получаемой в процессе штатного [9] измерения и оценки

физических переменных (токов, напряжений, перемещений, скоростей и др.);  
 средний уровень – [6]это [9]специализированный компьютер в составе функциональной системы или специализированный компьютерный модуль в составе центральной [6]машины [9]БВС БКУ, который служит для диагностики состояния внутренних функциональных контуров, в частности, контуров управления панелями солнечных батарей, ориентацией осей КА, [6] стабилизацией напряжения питания, поддержание заданной температуры в отсеках и других;  
 верхний «системный» уровень – центральная машина БВС БКУ, с помощью программных средств которой обеспечивается диагностика систем КА, как элементов его структуры и [9]

планируется проведение реконфигурации БА в случае возникновения АС.  
 Процесс восстановления работоспособности заключается в реализации следующей последовательности [4]:  
 исключение неисправного БА

из контура управления;  
 анализ наличия резерва у отказавшего БА, в том числе функционального;  
 подготовка и включение резервного БА в контур управления или реконфигурация системы в случае применения функционального резерва;  
 восстановление штатных функций системы КА;  
 формирование информации о готовности системы к [6]

обеспечению  
 целевого функционирования КА.  
 35

Можно утверждать, что СУЖ совместно с СУБА, СУСмС, СТКРП отвечают за контур структурного управления на борту КА. Основные средства контроля и структурного управления СУЖ приведены в таблице 1.  
 Таблица 1.1 – Средства контроля и управления в СУЖ при возникновении на КА аномальных ситуаций

Средства  
 контроля и  
 управления  
 Особенности  
 реализации в  
 современных КА  
 Достигаемые свойства

Система  
 контроля и  
 диагностики  
 состояния БА  
 Распределённая  
 система в составе  
 АСУ КА:  
 автономная часть в  
 составе БКУ;  
 интерактивная часть  
 в составе НКУ.  
 Высокая автономность принятия  
 (на борту) управленческих  
 решений в штатных условиях  
 работы и по большинству АС.  
 Свойство восстанавливаемости в  
 процессе эксплуатации

Контур  
 «аварийной»  
 защиты  
 бортовых  
 систем  
 Программные:  
 отдельные модули  
 БПО БКУ. Сигналы  
 от БА в систему  
 прерываний БВС  
 Оперативность реагирования на АС

на борту КА. Предотвращение развития АС. Сохранение штатных характеристик большинства БА.

Возможность оперативного выхода из АС

Бортовые аппаратные средства с интеллектуальными модулями БПО

Встроенные аппаратнопрограммные элементы контроля и анализа состояния БА.

Оперативность реагирования на АС в системах КА и неисправность БА.

Предотвращение развития АС в системах КА. Сохранение работоспособности БА.

Возможность оперативного восстановления работоспособности

[6] бортовых систем

[20]

Структурные и функциональные резервы БА КА

Избыточность: структурная и функциональная

Сохранение штатных характеристик бортовых систем за счёт управления структурной избыточностью или восстановление штатных функций систем и КА с допустимым изменением показателей

36

[6]

Стоит добавить, что помимо сложной технической структуры КА имеет сложную структуру алгоритмического обеспечения процесса управления. Алгоритмическое обеспечение, запрограммированное для бортовых вычислителей БВС, также называется бортовым программным обеспечением (БПО). При построении БКУ по принципу централизованного управления БВС состоит из центральной вычислительной машины, имеющей несколько резервных модулей. Если же в БКУ принят децентрализованный принцип, то кроме вычислительных средств БВС, другие системы БКУ также имеют вычислительные средства – бортовые вычислители [3].

Таким образом, ядром для контура структурного управления на борту КА является БВС, которой принадлежит организующая роль в процессе управления КА в целом, которая обеспечивается за счёт [57]:

- 1) Значительного увеличения производительности современных бортовых ЭВМ.
- 2) Активного применения микропроцессорных технологий в космической технике.
- 3) Значительной интеллектуализации бортовых алгоритмов управления.

Указанные возможности позволяют передать большую часть функций управления КА из НКУ на БКУ, что может существенно повысить автономность функционирования КА при эксплуатации, в том числе по целевому назначению.

37

1.3 Содержательное описание процесса реконфигурации СУД КА Для космического аппарата наблюдения основными функциями являются:

1. Съёмка земной поверхности с помощью установленной целевой аппаратуры, что подразумевает «сканирование» заданной области земной поверхности в заданные интервалы времени, обработка полученных данных и сохранение их в бортовом ЗУ в виде массивов целевой информации.
2. Передача массивов информации (как целевой информации, так и

информации о служебных системах, программной телеметрии) на наземные средства, обслуживающие данный КА.

3. Приём команд управления с НКУ.

Обеспечение условий выполнения вышеприведённых функций осуществляется с помощью обеспечения режимов ориентации КА в требуемой системе координат. Основными характеристиками режима ориентации является его точность ориентации, точность определения углового положения КА в требуемой системе координат (как правило, в инерциальной системе координат) и точность стабилизации. Характеристики режимов ориентации КА важны как для работы его целевой аппаратуры, так и для функционирования других подсистем КА, а также для осуществления информационного взаимодействия с наземными средствами НКУ. Системой, обеспечивающей требуемые характеристики режимов ориентации КА, является система управления движением (СУД). СУД – это совокупность чувствительных элементов, исполнительных органов и бортового программного обеспечения для реализации контура управления угловым движением КА при требуемых режимах ориентации КА.

Алгоритмы контура управления КА создаются на стадии разработки бортового программного обеспечения (БПО), исходя из состава бортовой аппаратуры СУД, основных задач КА и принятой технологии его управления.

В БПО они реализуются в виде отдельных функций или программных модулей режимов ориентации, выполняющих управление БА СУД, расчёт

38 требуемых параметров: управляющих воздействий для исполнительных органов, аргументов управления по углу и угловой скорости, коэффициентов управления, текущей ориентации КА, а также контроль измерительной информации и т.д.

В качестве чувствительных элементов и исполнительных органов СУД на современном этапе развития космической техники можно выделить:

- исполнительные органы [86]:

жидкостные ракетные двигатели,

электроракетные двигатели,

двигатели-маховики,

двухступенные и трёхступенные силовые гироскопические

комплексы,

магнитные исполнительные органы [37],

гравитационные штанги [72];

- чувствительные элементы [16]:

звёздные датчики,

солнечные датчики,

приборы ориентации по Земле [29],

магнитометры,

измерители угловой скорости,

акселерометры,

бортовые GPS и ГЛОНАСС навигаторы.

Для реализации основных функции КА в данной работе

рассматриваются соответствующие режимы ориентации.

1) Штатный режим («точной» ориентации), для реализации которого используют:

- прецизионные измерительные приборы, такие как, звёздные датчики и измерители угловой скорости (ИУС);

- электромеханические исполнительные органы с малым шагом

управляющего момента, например, двигатели-маховики (ДМ).

39

Также для компенсации («разгрузки») накопленного двигателями-маховиками кинетического момента необходимо использовать специальную

магнитную систему (система сброса кинетического момента (ССКМ)) или

жидкостные ракетные двигатели (ЖРД). Соответственно для «разгрузки» ДМ

предусматриваются специальные алгоритмы: «разгрузка» на ЖРД или

«разгрузка» на ССКМ.

2) Режим «грубой» ориентации может быть реализован с помощью

измерителей угловой скорости и приборов ориентации по Земле (ПОЗ),

менее точных по сравнению со звёздными датчиками. В качестве

исполнительных органов могут использоваться как ДМ совместно с ССКМ,

так и отдельно ЖРД.

3) Режим неориентированный полёт (штатное выключение СУД),

использующий гравитационный момент для удержания КА в заданных

отклонениях по углу.

Таким образом, для каждого режима предусматривается определённый

состав бортовой аппаратуры и алгоритмов СУД.

Введём понятие рабочей конфигурации БА СУД, под которой будем

понимать совокупность включенных в контур управления угловым

движением в текущем режиме ориентации КА чувствительных элементов и

исполнительных органов СУД.

Текущая конфигурация БА СУД и взаимосвязь между ее элементами

образуют техническую структуру СУД. Структура бортового программного обеспечения, где в узлах структуры находятся алгоритмы СУД (управления БА, контроля, расчёт параметров и т.д.) для текущего режима ориентации КА, а дуги характеризуют логическую взаимосвязь между ними и последовательность выполнения является функциональной структурой СУД. Бортовая аппаратура может находиться в работоспособном или неработоспособном состоянии, а также участвовать в контуре управления угловым движением (находится в рабочей конфигурации БА СУД). Возможные состояния БА представлены в таблице 2.

40

Таблица 1.2 – Признаки состояний БА

Признаки

Состояние

Включено

в контур

Работоспособно

Комментарии

1 + + Аппаратура работает штатно в контуре управления (в той или иной рабочей конфигурации)

2 + – Аппаратура работает некорректно или отказала, но задействована в контуре управления. На длительных интервалах такие ситуации могут приводить к развитию аварийных ситуаций

3 – + Аппаратура находится в «холодном» резерве

4 – – Аппаратура исключена из контура управления для возможного восстановления её работоспособности и последующего включения в контур управления или перевода в «холодный» резерв

Совокупность технической и функциональной структуры СУД будем называть структурным состоянием СУД. Структурное состояние СУД характеризует режим ориентации и выполняемые КА функции. Всё множество технических состояний КА делится на работоспособные, частично работоспособных и неработоспособные в соответствии с классификацией, приведенной в подразделе 1.1. Под работоспособным состоянием КА понимаем состояние, при котором выполняются функции наблюдения КА за поверхностью Земли и информационного взаимодействия (передачи массивов целевой и телеметрической информации и приёма управляющих воздействий), а под частично работоспособным – состояние, при котором выполняются только функции информационного взаимодействия. Неработоспособным состоянием КА является состояние,

41

при котором может быть выполнен только приём команд управления, с целью вывода КА из неработоспособного состояния. Таким образом, работоспособность КА зависит от структурного состояния СУД. Всё подмножество работоспособных состояний КА будем называть областью работоспособности, а всё подмножество частично работоспособных – областью частичной работоспособности. На рисунке 1.7 показано графовое представление, описывающее альтернативные переходы между режимами ориентации КА и соответствующие данным режимам области работоспособности КА.

Рисунок 1.7 Граф эволюции работоспособности КА

Другими словами, каждому состоянию КА соответствует рабочая конфигурация БА и текущий режим ориентации, реализуемый СУД (техническая и функциональная структура).

Рассматривая функционирование КА в динамически изменяющихся условиях, формируемых внешней средой, мы постоянно сталкиваемся с возмущающими воздействиями, имеющими различную природу. Прежде всего, такие возмущающие воздействия связаны с эксплуатацией КА в экстремальной космической среде. Как следствие на борту КА возникают

42

сбои и отказы бортовой аппаратуры, которые являются определяющими событиями для проведения реконфигурации БА СУД.

Согласно ГОСТ 27.002 – 2009 «Надежность в технике».

Термины и определения» под отказом понимается событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния [45]

объекта (бортовой аппаратуры), а под сбоем -

самоустраняющийся отказ или однократный отказ,  
устраняющийся незначительным вмешательством оператора.

[21]

После сбоя или отказа БА необходимо задать новую конфигурацию БА и, при необходимости, режим ориентации КА, т.е. осуществить синтез новой структуры контура управления угловым движением. При этом КА может быть переведён из одной области состояний в другую: работоспособную, частично работоспособную, неработоспособную или может оставаться в текущей области работоспособности. В случае невозможности сохранить работоспособное или частично работоспособное состояние КА может быть временно переведён в неработоспособное состояние. Такое состояние может предполагать локализацию неисправной БА путём её исключения из рабочей конфигурации и в особых случаях неориентированный, но контролируемый НКУ, полёт для проведения диагностики всей БА СУД. Цель управления КА в указанной ситуации состоит в переводе КА из неработоспособного в работоспособное состояние для продолжения его работы по целевому назначению, что сопровождается изменением структурного состояния СУД. Рассмотрим процесс деградации структуры некоторой системы, то есть перехода из начального структурного состояния S

0

в некоторое

финальное (частично или полностью работоспособное) состояние S

f

.

43

Рисунок 1.8 Исходное и финальное структурное состояние КА применительно к СУД деградационного процесса (Д-процесс), характеризуется выходом из строя БА и соответствующим разрушением структурных связей. В общем виде множество неисправных элементов (БА) обозначим

. Тогда, учитывая, что в неработоспособное или частично работоспособное состояние КА переходит вследствие сбоев (или отказов) БА, имеющих случайный характер, возможны любые сценарии деградации структуры из S

0

в S

f

, которые можно записать следующей цепочкой:

При возникновении неисправности элемента происходит переход

из структурного состояния

в новое структурное состояние

.

Специфика реконфигурации СУД КА заключается в следующем:

– на борту КА происходят не только Д-процессы, но и В-процессы, то есть восстановление сбиившей БА, что требует каждый раз рассматривать задачу полноценного синтеза нового структурного состояния системы

с

учёт состояний всей имеющейся основной и резервной БА;

– при синтезе нового структурного состояния СУД

требуется

рассмотрение различных режимов ориентации КА. Каждый режим может соответствовать работоспособному или частично работоспособному состоянию КА.

44

Для наглядности приведём пример реконфигурации для системы, состоящей из десяти структурных элементов

, которая

имеет три режима работы (ориентации)

. На рисунке 2.2

представлено изменение структурных состояний такой системы, где – множество неисправных элементов. В частности, следует отметить, что переходы системы в новые структурные состояния происходят как в рамках одного режима, так и между режимами. Каждый режим работы системы обеспечивает выполнение заданного набора функций.

а) реконфигурация в рамках одного режима

б) реконфигурации при смене режимов

Рисунок 1.9 Д-процесс при реконфигурации с учётом различных режимов работы системы

45

Таким образом, для проведения реконфигурации СУД требуется описание структурной динамики на борту с учётом изменения технических состояний БА (не только Д-, но и В-процессы), а также с учётом



возможности изменения режимов ориентации КА.

Проведение реконфигурации СУД осложняется тем, что в процессе функционирования на борту КА происходит постоянное изменение информационного, временного, энергетического ресурса и характеристик его бортовой аппаратуры. Переключение режимов ориентации КА, ввод в строй резервной бортовой аппаратуры, вывод из строя неисправной аппаратуры, восстановление работоспособности КА, все эти события влияют на выполняемые КА функции и на выбор рабочей конфигурации БА СУД. Также, например, при переходе из области работоспособности в область частичной работоспособности, изменяются характеристики восполнение электроэнергии системы энергопитания КА. Всё это ведёт к изменению технологии управления КА. Таким образом, функционирование КА предполагает изменяющиеся во времени характеристики расхода/восполнения бортового ресурса и ограничения на информационное взаимодействие КА, а переход между режимами ориентации КА и изменение рабочей конфигурации БА – как реконфигурацию СУД.

Как правило, проведение реконфигурации возлагается на НКУ. Однако при возникновении сбоев или отказов БА затрачивается значительное время на их идентификацию и принятие решения о смене рабочей конфигурации БА, что связано с перерывами в сеансах связи НКУ с КА. Также следует отметить, что принятие решения о смене конфигурации БА может являться следствием типового сбоя БА, а время, затрачиваемое на выработку этого решения, оказывается значительным из-за человеческого фактора (организации управления КА). К тому же при принятии решения может не учитываться состояние бортового ресурса, его экономное расходование. Если же реконфигурацию организовать на борту КА без привлечения НКУ, то это позволит принимать решения о смене конфигурации БА в

46

автоматическом режиме, не дожидаясь вхождения КА в зону радиовидимости, а также снизит нагрузку на группу управления КА. Таким образом, выделим два типа сценария проведения реконфигурации: это реконфигурация посредством НКУ и автоматическая реконфигурация на борту КА.

Рассматривая введение различных сценариев реконфигурации, необходимо оценить качество функционирования КА. Для оценки качества функционирования КА предлагается использовать (согласно ГОСТ 27.002 – 2009)

комплексные показатели надежности: [29] коэффициент технического использования и коэффициент сохранения эффективности. Коэффициент технического использования – это отношения математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и [21]

простая, обусловленного техническим обслуживанием или ремонтом за тот же период. Под «ремонтом» можно понимать процесс парирование нештатных ситуаций за счёт реконфигурации СУД. Для рассматриваемой задачи дополнительно к времени нахождения КА в работоспособном состоянии может быть добавлено время нахождения КА в частично работоспособном состоянии, а простои будут определяться неработоспособным состоянием и задержкой при принятии решения о проведении реконфигурации и ожиданием ближайшего сеанса связи.

Коэффициент сохранения эффективности – отношение значения показателя эффективности использования объекта по назначению за определённую продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленного при условии, что отказы объекта в течение того же периода не возникают. В [21]

качестве показателя эффективности функционирования КА наблюдения может выступать число проведённых сеансов целевой аппаратуры. Также для КА можно рассматривать в качестве показателя эффективности его функционирования общий объём информации, 47

переданный на наземные средства. Данные показатели зависят от суммарного времени нахождения КА в работоспособном и частично работоспособном состоянии.

Таким образом, повышение надежности функционирования КА требует проведения реконфигурации СУД для обеспечения нахождения КА в работоспособном или частично работоспособном состоянии максимально продолжительный период времени, а в случае невозможности реализации такого управления БА, должно быть обеспечено оперативное восстановление работоспособности КА.

На основании вышеизложенной содержательной постановки суть решаемой задачи проведения реконфигурации СУД сводится к следующему: известно: текущее и требуемое технические состояния БА КА в виде соответствующих рабочих конфигурации БА и режимов ориентации, а также ограничения на расход бортовых ресурсов БА. требуется найти: такую последовательность изменения структурных состояний БА КА (рабочей конфигурации БА и режима ориентации), и соответствующую программу реконфигурации СУД для которых обеспечивался перевод из текущего в требуемое техническое состояние БА КА с целью обеспечения заданного (либо оптимального) уровня значений комплексных показателей надежности функционирования КА.

#### 1.4 Разработка теоретико-множественной модели процесса реконфигурации СУД КА

Для формализации модели процесса реконфигурации СУД КА введем в рассмотрение следующие базисные множества:

- множество технических средств (ТСр) НКУ;
- множество каналов информационного взаимодействия  $j$ -го технического средства;

- множество операций, входящих в типовой технологический цикл управления (ТЦУ) КА;
- множество функций, реализуемых КА для выполнения основной целевой задачи;
- множество режимов ориентации КА;
- множество алгоритмов управления угловым движением, реализуемых СУД в бортовом программном обеспечении КА;
- множество бортовой аппаратуры КА;
- множество ресурсов КА, обеспечивающих работу его БА и функционирование в целом.

В соответствии с содержательной постановкой задачи реконфигурации СУД КА реализуются следующие функции:

- съёмка земной поверхности с помощью установленной целевой аппаратуры,
- передача массивов информации (целевой и телеметрической) на наземные средства,
- приём команд управления в зонах радиовидимости. Множество режимов ориентации КА включает в свой состав:

- штатный режим («точная» ориентация КА),
- режим с «грубой» ориентацией,
- 

неориентированный полёт КА. Режим ориентации КА определяет качество функционирования КА и выполняемые им функции. Соответствие реализуемых функций и режимов ориентации КА представлено в таблице 2.

Таблица 1.3 – Соответствие режимов ориентации и функций КА  
Функции КА, Режимы ориентации КА, R

+  
+  
+  
+  
+  
-  
+  
-

Для формального описания структурной динамики при функционировании КА введём в рассмотрение системный

динамический альтернативный мультиграф (ДАМГ) следующего вида:

49

, (1.1)

где  $i$  – индекс, характеризующий тип структуры [13]

контура

управления КА;

- описывает функциональную структуру контура управления угловым движением (СУД) КА и учитывает альтернативные варианты реализации режимов ориентации,
- множество вершин, отражающих алгоритмы управления угловым движением СУД при реализации режимов ориентации КА,
- множество дуг определяющих последовательность выполнения и взаимосвязь алгоритмов при реализации

режимов ориентации КА;

- описывает техническую структуру СУД КА и учитывает альтернативные варианты рабочей конфигурации БА,
- множество вершин, соответствующих БА СУД,
- множество дуг отражает варианты взаимодействия БА СУД для реализации режимов ориентации КА;
- описывает технологическую структуру управления КА и учитывает альтернативные варианты реализации ТЦУ КА, здесь

- множество вершин, отражающих альтернативные варианты реализации операций ТЦУ КА,
- множество дуг графа, отражающих логические и временную взаимосвязь между операциями ТЦУ КА;
- множество моментов времени, на котором можно выделить интервал проведения реконфигурации

Кроме того, зададим множество допустимых (исходя из содержательного описания процесса реконфигурации СУД) операций отображения:

, (1.2)

С учётом вышеизложенного, структурное состояние КА в момент времени  $t$

можно определить, как подмножество декартова произведения множеств элементов, на которых строятся [\[13\]](#)

функциональная, техническая и технологическая структуры БА СУД:

50

Введём ещё множество допустимых операций отображения:

. (1.4)

При этом предполагается, что каждое состояние КА в

момент времени  $t$

задаётся в результате операции композиции соответствующих ДАМГ, описывающих каждый тип структуры.

[\[13\]](#)

Согласно содержательной постановки задачи введём два допущения. Во-первых, структурное состояние КА обладает временными интервалами постоянства, при этом его изменение может происходить в следствии:

- 1) возникновения сбоя или отказа БА;
  - 2) восстановления работоспособности БА (данная БА может быть включена в контур управления);
  - 3) принудительное проведение реконфигурации СУД;
- то есть существуют интервалы постоянства структур КА. Каждому подынтервалу соответствует структурное состояние КА

Во-вторых, процесс изменения технического состояния занимает незначительное время по сравнению с интервалом его постоянства. Тогда интервал

, на котором проводится реконфигурация БА СУД, можно разбить на некоторое число  $M$  подынтервалов

Решение задачи выбора наиболее предпочтительной программы реконфигурации СУД КА можно интерпретировать как поиск

последовательности (композиции) выполнения операций отображения вида (1.4) во времени

, [\[13\]](#)

при которой обеспечиваются экстремальные значения показателей эффективности функционирования КА.

51

С учётом вышеизложенного поиск наиболее предпочтительной программы реконфигурации СУД КА может быть формально представить следующим образом:

,

,

где – показатель или набор показателей, характеризующих качество

функционирования КА (в качестве таких показателей могут быть использованы коэффициент технического использования и коэффициент сохранения эффективности), – множество номеров ограничений, определяющих функционирование КА,  
– заданные величины,  
определяющие эти ограничения,  
– множество программ управления,  
удовлетворяющих ограничениям на функционирование КА.

В соответствии с содержательным постановкой решаемой задачи в качестве ограничений рассматриваются ограничения на энергопотребление, ограничения на временной ресурс БА СУД, ограничения на вхождения КА в зону радиовидимости технических средств НКУ, соответственно

– величины, характеризующие расход электроэнергии на борту КА, временной ресурс БА, зону радиовидимости технических средств НКУ.

Следует отметить, что для моделирования процесса реконфигурации СУД КА потребуются использование аналитико-имитационного комплекса моделей, в который должны войти:

- аналитическая модель реконфигурации СУД КА;
- модель орбитального движения КА;
- модель взаимодействия КА с наземными средствами НКУ (передача массивов целевой информации и телеметрии, приём управляющих команд, программ);

52

- модель работы бортовых средств КА (моделирование сбоев и отказов БА, режимов работы СУД, структуры контура управления, расхода бортового ресурса, работы КА по целевому назначению).

Имитационные модели будут рассмотрены в четвертом разделе диссертации при описании результатов проведенных машинных экспериментов, а аналитическая модель реконфигурации СУД во втором разделе.

Выводы

В завершении раздела можно сделать следующие выводы:

1. Проанализированы основные тенденции в сфере космических информационных технологий, к которым можно отнести: повышение автономности и живучести современных КА, внедрение подсистем диагностики технического состояния, управление живучестью КА, структурными и функциональными резервами. Бортовой комплекс управления играет всё большую роль в организации функционирования КА, в том числе в управлении структурной динамикой КА.
2. Рассмотрена специфика функционирования КА, а также существующие подходы к управлению бортовой аппаратурой. В рамках данных подходов применяются алгоритмы так называемой стандартной («слепой») реконфигурации при функционировании БА СУД. Анализ современных существующих вариантов стандартной реконфигурации СУД показал, что при проведении реконфигурации не учитываются целевые, информационно-технологические, ресурсные, структурные возможности КА для обоснованного перехода из одного структурного состояния в другое.
3. Проведено содержательное описание процесса реконфигурации СУД КА. При этом реконфигурация СУД заключается в переходе между режимами ориентации КА и изменении рабочей конфигурации БА
4. Разработана теоретико-множественная модель процесса реконфигурации СУД КА. С учетом этого дальнейшие исследования состоят

53

в разработке научно-методического аппарата поиска наиболее предпочтительной программы реконфигурации СУД, при которой обеспечиваются экстремальные значения показателей эффективности функционирования КА.

54

Раздел 2. Аналитическая модель реконфигурации СУД КА

2.1 Логико-вероятностный подход к описанию структуры СУД.

Основные структурные показатели

Для исследования возможных сценариев проведения реконфигурации СУД КА можно использовать следующие методы и средства моделирования [77]:

-

метод марковского моделирования;

- метод деревьев отказов;

- логико-вероятностные методы.

[16]

Анализ данных методов показал преимущество группы логиковероятностных методов по следующим причинам:

- данный подход позволяет использовать все известные виды структурных схем, описывающих функционирование КА (параллельнопоследовательные соединения, сетевые

графы связности с циклами, деревья отказов, деревья событий, схемы функциональной целостности);

- позволяет выполнять аналитические и статистические, приближённые и точные расчёты различных показателей структурной надёжности КА;
- позволяет оценить роль отдельных элементов в структуре КА [60];
- 

современный уровень разработки логико-вероятностных методов позволяет автоматизировать процессы построения [16]

вероятностных моделей функционирования КА и обеспечивает решение задач структурнологического моделирования большой размерности и высокой структурной сложности [52].

В рамках анализа логико-вероятностных методов [52, 60, 77] для моделирования структурных состояний КА следует использовать

общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ) [51,52,68], являющийся развитием классических методов логико-вероятностного исчисления. Главная особенность и принципиальное отличие ОЛВМ от классических ЛВМ 55

заключается в том, что ОЛВМ включает новые средства графического представления структур систем (схемы функциональной целостности - СФЦ), включающие изобразительные средства функционально-полного набора логических операций "И", "ИЛИ" и "НЕ". Кроме того, предложенный в ОЛВМ [52] универсальный графический аппарат СФЦ, а также графоаналитический метод решения логических уравнений, позволяют построить логико-вероятностную модель функционирования [1] КА, учитывающую независимые, [8]несовместные события, множественные состояния [1]элементов, [8]многофункциональные элементы и подсистемы. В [1]

качестве моделей функционирования КА, построенных при помощи ОЛВМ, выделяют традиционные вероятностные модели, которые представлены в виде вероятностных полиномов (вероятностных функций) как наиболее подходящий инструмент для исследования структуры (важности её элементов) и для реализации алгоритмов реконфигурации рассматриваемых систем. Также стоит отметить новый способ представления структуры с использованием генома структуры, формализованный в качестве вектора, компоненты которого являются коэффициентами вероятностного полинома однородной структуры (полинома работоспособности или отказа, неработоспособности) [59].

Структуры КА можно представить в виде графических схем функционирования. В результате анализа графических схем можно найти соответствующий структурный полином. Однако в настоящее время существуют технологии автоматизированного структурно-логического моделирования [53]. Такая технология реализована в программном комплексе «Арбитр» для анализа структурно-сложных систем. Графическая схема функционирования КА в программном комплексе задаётся в виде СФЦ [50].

Рассмотрим элементарные схемы взаимодействия бортовой аппаратуры КА: последовательное, параллельное, мажоритарное соединение и построим соответствующие вероятностные полиномы (ВП) для таких схем.

56  
ВП в ОЛВМ строятся на основе

ортогонализации функций алгебры логики ([3]ФАЛ) и замещения логических аргументов в ФАЛ вероятностями их истинности, а логических операций соответствующими арифметическими. [1]

ФАЛ описывает работоспособность (или неработоспособность) системы с точки зрения законов математической логики.

Рисунок 2.3 Параллельное соединение  
Функция алгебры логики для параллельного соединения двух структурных элементов

, где  
– события,  
характеризующие исправную работу соответствующих элементов X  
1  
и X

2

(под которыми подразумеваются БА). Тогда вероятностный полином имеет следующий вид:

, где

– вероятность того, что элемент X

i

работает исправно, то есть достоверно событие

.

Рис 2.4 Последовательное соединение

ФАЛ для последовательного соединения

, ВП -

.

Рисунок 2.5 Мажоритарное соединение

57

Работоспособное состояние структуры, представленной на рисунок 2.5, определяется за счёт работы двух любых технических средств из трёх.

ФАЛ для мажоритарного соединения:

. ВП принимает вид

.

На основе введённых вероятностных полиномов рассмотрим частные структурно-топологические показатели качества функционирования КА.

Одним из таких показателей является показатель структурной надёжности, то есть интегральная оценка надёжности КА исходя из её структурного построения [90].

Представим вероятностный полином

в

виде функции зависящей от одного типа переменной: либо от вероятности отказа

, либо от вероятности работоспособности элемента

структуры

посредством замены

или

.

Тогда для случая однородной структуры (одинаковая вероятность безотказной работы или вероятность отказа для всех элементов системы) ВП может быть представлен соответственно в виде:

или

. Полиномы и

изменяют свои значения в интервале от [0,1], причём чем ближе

графики функций к прямой, тем больше оценка надёжности

КА по своему структурному построению, а для, чем ближе график к

прямой, тем меньше оценка надёжности КА. Таким образом, в

качестве интегрального показателя структурной надёжности системы в

состоянии

используется показатель

.

Аналогично в случае неоднородной структуры (различная вероятность отказа элементов структуры КА) будем использовать формулу

интегрального показателя структурной надёжности системы в состоянии

-

58

. Для полинома

справедливо следующее разложение:

,

(2.1)

тогда интегральный показатель можно вычислить по следующей формуле:

, (2.2)

или

. Тогда интегральную оценку для неоднородной структуры с

полиномом

можно вычислить по следующей

формуле:

. (2.3)

Наряду с вычислением показателя структурной надёжности КА,

предлагаемый подход будем использовать для определения других

структурно-топологических показателей, связанных с оценкой отдельных

элементов системы, их роли в структурном построении: значимости

59

элемента, его положительного и отрицательного вклада в структурную

надёжность [22, 63, 66]. Так для вычисления значимости, положительного и

отрицательного вклада i-го элементов в структурную надёжность КА для

текущего состояния

следует воспользоваться ВП вида:

,

,  
 ,  
 где  
 – ВП текущей структуры  
 ;  
 , – ВП текущей структуры  
 при выходе  $i$ -го элемента из строя;  
 – ВП текущей структуры  
 при безотказной  
 работе  $i$ -го элемента;  
 - ВП положительного и отрицательного вклада  
 $i$ -го элемента в структурную надёжность;  
 - ВП значимости  $i$ -го элемента  
 для структурной надёжности. Также вероятностные полиномы значимости,  
 положительного и отрицательного вклада можно записать в следующем виде:  
 , (2.4)  
 , (2.5)  
 . (2.6)

Стоит отметить, что одни и те же элементы в различных структурных состояниях могут обладать различными структурно-топологическими свойствами, поэтому с изменением структурного состояния системы полином значимости (вклада) элемента будет также изменён. Зная вероятностные полиномы значимости, положительного и отрицательного вклада элемента в структурную надёжность, можно аналогично формуле (2.3) найти значение соответствующих показателей для неоднородной структуры:

60  
 (2.7)  
 (2.8)  
 . (2.9)

Положительный и отрицательный вклад характеризуют приращение структурной надёжности в случае абсолютной надёжности и неисправности (отказа) элемента соответственно, а значимость элемента – это его суммарный вклад (положительный и отрицательный) в структурную надёжность.

## 2.2 Формализованное описание структуры СУД КА

### 2.2.1 Состав системы управления движением

Каждую группу бортовой аппаратуры, описанной ранее, будем рассматривать как отдельную подсистему: подсистему чувствительных элементов и подсистему исполнительных органов. Очевидно, что ни одна из подсистем не может обеспечивать штатную работу КА, то есть важное условие работоспособности СУД, заключается в одновременной работоспособности подсистем чувствительных элементов и исполнительных органов. Для каждой подсистемы далее будут рассмотрены свои структуры. Также нельзя говорить о независимой работе двух подсистем СУД в рамках режима работы КА, так как обе подсистемы работают для реализации алгоритма управления всем КА. При этом точность отработки рассогласования измеренного и заданного значения некоторого параметра (например, угловой скорости) зависит как от характеристик исполнительных органов, так и от погрешности чувствительных элементов.

Согласно описанным в разделе 1 режимам ориентации прокомментируем специфику каждого режима. Для режима №1 («точная» ориентация) необходимо использование прецизионных приборов, осуществляющих точную ориентацию и стабилизацию КА. Режим №2 («грубая» ориентация) может быть реализован с точностью не соответствующей целевому функционированию, однако, приемлемой для

61  
 осуществления информационного взаимодействия «борт-Земля». Режим неориентированного полёта (режим №3), иногда называемый аварийный режим, необходим для восстановления работоспособности КА за счёт перезагрузки бортовой аппаратуры и устойчивого функционирования других бортовых систем КА в случае невозможности парирования нештатной ситуации в СУД программными средствами БКУ. Для режима №3 может предполагаться гравитационная ориентация, когда не задействуются исполнительные органы и/или чувствительные элементы.

### 2.2.2 Подсистема чувствительных элементов СУД

Рассмотрим техническую и функциональную структуры подсистемы ЧЭ для перечисленных ранее режимов ориентации КА. Для прецизионной схемы определения ориентации необходимо измерение углового положения и угловой скорости КА. Измеритель угловой скорости (поплавковый, волоконно-оптический, с MEMS-технологиями и т.п.) можно считать ядром прецизионной подсистемы ЧЭ. В качестве источников информации об угловом положении рассмотрим наиболее распространённые в космическом приборостроении оптико-электронные датчики: звёздный датчик и прибор ориентации по Земле.

Основные принципы работы БА СУД и их функции в контуре определения ориентации следующие.

Прибор ориентации по Земле (ПОЗ) обеспечивает выдачу в бортовую вычислительную систему измерений по двум каналам, соответствующим отклонению радиальной направляющей орбитальной СК КА от местной вертикали (направления на Землю): по крену и тангажу.

Оптический

звёздный датчик ( ОЗД) производит снимки звёздного неба и посредством обработки снимков определяет положение прибора в инерциальной системе координат (ИСК). Положение прибора, [12]

как правило, характеризует измеренный кватернион ориентации [18], также в БПО вычисляется заданный кватернион ориентации, тем самым вычислив их разность, 62

получаем результирующий кватернион, который можно перевести в три угла ориентации по каждой из осей (X,Y и Z) в заданной системе координат. Стоит отметить, что оптические звёздные датчики (ОЗД) могут измерять и угловую скорость, однако погрешность таких измерений зачастую не соответствует требованиям «точной» ориентации КА. Поэтому непосредственно измерение угловой скорости осуществляет соответствующая БА. Хорошо зарекомендовали себя измерители угловой скорости (ИУС) на основе волоконно-оптических гироскопов. Каждый волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) – это независимый модуль измерения, представляющий ось чувствительности угловой скорости, то есть измерение угловой скорости происходит вдоль оси установки ВОГ [89]. Можно получать значения углов интегрированием угловой скорости измеренной ВОГ, однако при интегрировании на больших временных промежутках из-за систематических и случайных погрешностей возникает значительная ошибка измерений как для «точной», так и для «грубой» ориентации КА [1]. В таких случаях ошибка интегрирования угловой скорости компенсируется с помощью измерений ОЗД.

Таким образом, мы видим, что по функционалу разнотипные приборы могут дополнять друг друга. Однако, не являясь универсальной заменой, возможна организация взаимного контроля на достоверность поступающей с приборов измеренной информации, тем самым возникает необходимость в дублировании не только однотипной БА, но и БА со схожим функционалом. Это подтверждается практикой проектирования СУД перспективных и опытных КА, которая показывает, что при разработке схем определения ориентации в подсистему ЧЭ должна быть введена структурная и функциональная избыточность. Введение избыточности связано, прежде всего, с особенностями работы ЧЭ (засветка ОЗД Солнцем и Луной, невозможность работы ПОЗ при произвольной ориентации), сбоями цифровых устройств в составе ЧЭ вследствие воздействия тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ) или иных факторов космического пространства, 63

являющихся основной причиной сбоев электроники. Для обеспечения отказо- и сбоеустойчивости ИУС компонуются более чем тремя ВОГ, с предусмотренным съёмом информации с каждого ВОГ в отдельности. Таким образом, будем рассматривать подсистему ЧЭ СУД, состоящую из четырёх ОЗД, двух ПОЗ, двух ИУС (в составе каждого ИУС по четыре ВОГ).

Введём соответствие для режимов СУД и подключаемых в контур управления чувствительных элементов в виде схем ориентации (СхО) [44] с учётом вышеописанных функций БА. Для реализации работы КА по целевому назначению должна осуществляться одновременная работа двух из четырёх ОЗД и работа одного из двух ИУС (либо ИУС 1, либо ИУС 2) в конфигурации трёх любых ВОГ[1]. Такая схема ориентации будет называться основной (ОСхО), так как обеспечивает заданную точность на всём интервале за счёт работы двух ОЗД. По второй схеме, которую обозначим как дублирующую (ДСхО), также возможна реализация целевой работы. Дублирующая схема может служить для контроля правильности работы основной схемы, а также её замены в случае сбоя ЧЭ. ДСхО реализуется при работе любого одного прибора ОЗД совместно с работой одного из ПОЗ и работой одного из ИУС в конфигурации трёх ВОГ. Работа одновременно ОЗД с ПОЗ предусматривает также заданную точность за счёт возможности ПОЗ «подстраховывать» работу ОЗД на критичных участках (засветки Солнцем, Луной, сбой при прохождении аномальных зон). Связь КА с НКУ может происходить по одной из штатных схем ориентации, однако, если не учитывать жёсткие ограничения по ориентации и стабилизации, тогда возможно применить экстренную схему ориентации (ЭСхО), не удовлетворяющую условиям работы КА по целевому назначению. При работе ЭСхО задействованы один из ПОЗ или ОЗД и два ВОГ любых ИУС с обязательным интегрированием одного из углов



(например, ось Y в орбитальной системе координат) или по алгоритму,  
64

приведённому в [14]. Условимся, что интегрируемый угол измеряется одним определённым ВОГ из четырёх в каждом ИУС (допустим первым). На основе схем ориентации СУД будем говорить о подмножестве работоспособных состояний КА, а в случае ЭСХО – о подмножестве частично работоспособных.

Проиллюстрируем схематично условия работоспособности каждой из СХО на рисунке 2.8.

- а) Основная схема ориентации
- б) Дополнительная схема ориентации

65  
в) Экстренная схема ориентации

Рисунок 2.6 Схемы ориентации подсистемы ЧЭ СУД

Составим вероятностные полиномы работоспособности для данных технических структур в соответствии с логикой работы ЧЭ СУД. Запишем ФАЛ для схем определения ориентации при работе целевой аппаратуры КА (ОСХО, ДСХО) в общем виде:

, (2.10)

где

– логические переменные, описывающие условие работоспособности ОЗД 1,2,3,4 соответственно,  
– логические

переменные, описывающие условие работоспособности ПОЗ 1 и 2,

– логические переменные, описывающие условие работоспособности ВОГ1,2,3,4 прибора ИУС 1,  
– логические

переменные, описывающие условие работоспособности ВОГ1,2,3,4 прибора ИУС 2.

В формуле (2.10) функция

описывает условия работоспособности

ПОЗ и приборов ОЗД, а функции f

2

и f

3

– приборов ИУС 1 и ИУС 2

соответственно. Схема функционирования ОСХО и ДСХО представлена на рисунке 2.6 а), б).

Найдём вероятностные полиномы функции

, f

2

и f

3

для ОСХО [20].

Преобразуем f

1

к дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ) пронумеровав её

члены:

66

Преобразуем ДНФ

к ортогональной ДНФ:

67

, (2.11)

где

и

– вероятность работоспособности и

отказа приборов ОЗД,

и

– вероятность работоспособности и

отказа ПОЗ.

Так как условия работоспособности для приборов ИУС-1 и ИУС-2

идентичны, тогда функция

аналогична

. Преобразование

к ВП

будет осуществляться по следующим формулам:

, (2.12)

68

где

и

– вероятность соответственно работоспособности и

отказа i-го ВОГ j-го ИУС. Запишем итоговый вероятностный полином для

условия работоспособности ОСХО:

. (2.13)

Для ЭСХО вероятностный полином будет выглядеть следующим

образом:

], (2.14)

где

,

.

Зная вероятностные полиномы работоспособности СхО, мы можем вычислить интегральный показатель структурной надёжности для подсистемы ЧЭ с неоднородными элементами по формуле (2.3), то есть для соответствующего структурного состояния КА.

### 2.2.3 Подсистема исполнительных органов СУД

Управление КА может осуществляться с использованием ИО СУД, взаимодействующих с внешними по отношению к КА силами (магнитным, гравитационным, силами солнечного давления, аэродинамическим силам), или ИО СУД, основанных на реактивных принципах [86], которые в свою очередь делятся на:

- 1) управляющие реактивные двигатели;
- 2) инерционные исполнительные органы.

69

Отметим преимущества и недостатки первого и второго типа исполнительных органов, основанных на реактивных принципах.

Управляющие реактивные двигатели функционируют за счёт отброса массы (рабочего тела), запас которого на КА ограничен, в отличие от инерционных ИО, которые работают за счёт восполняемой электроэнергии. Ещё одно достоинство инерционных ИО – это высокая точность реализации управляющего момента по сравнению с управляющими ракетными двигателями. Однако, для инерциальных ИО необходима разгрузка накопленного кинетического момента, так как принцип этих ИО основан на перераспределении кинетического момента системы «КА+ИО». Таким образом, инерционные ИО могут устанавливаться на КА только совместно с ИО, осуществляющими разгрузку накопленного кинетического момента.

Такими ИО могут служить либо управляющие реактивные двигатели (термокаталитические, стационарные плазменные, жидкостные двигатели [78, 88]), либо ИО, взаимодействующие с внешними по отношению к КА силами (магнитные системы [19], гравитационные системы).

Состав подсистемы ИО определяется следующим образом: система жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) из трёх блоков двигателей, осуществляющая управление как угловым движением, так и центром масс, система из четырёх двигателей-маховиков (ДМ) [14], предназначенная для точной ориентации, и электромагнитная система сброса кинетического момента (ССКМ), состоящая из трёх магнитных стержней (МС) и применяемая также в исключительных случаях для грубой ориентации КА. Из описания режимов ориентации КА следует, что «точная» ориентация осуществляется с помощью ДМ. Для «разгрузки» ДМ можно использовать как блоки ЖРД, так и ССКМ. Для «грубой» ориентации возможно управление на ЖРД, при условии работы всех блоков двигательной установки. Режим НП не предусматривает работу системы ИО. Таким образом, можно говорить о двух технических структурах СУД с

70

учётом логики работы ИО, которые определяются следующими двумя схемами стабилизации («точная» и «грубая» соответственно):

либо работа трёх из четырёх ДМ совместно с работой двух из трёх МС ССКМ для «разгрузки» системы ДМ, либо «разгрузка» производится на двух любых блоках ЖРД (схема на основе ДМ);

либо работа трёх блоков ЖРД (схема на основе ЖРД).

Техническая структура подсистемы ИО построенная по второй схеме, характеризуется повышенным расходом топлива, однако, в случае сбоя электромеханических ИО (ДМ или МС ССКМ) без схемы ориентации на ЖРД не обойтись. Также отметим пониженное энергопотребление для схемы с ЖРД. На рисунке 2.7 изображено условие работы для двух технических структур: либо работа схемы на основе ДМ, либо – на основе ЖРД.

### Рисунок 2.7 Схема функционирования ИО СУД

Составим вероятностный полином для схемы функционирования ИО, приведённой на рисунке 2.7. Данная схема является общей для подсистемы

71

ИО, которая соответствует двум техническим структурам. Запишем функцию алгебры логики для этой схемы:

, (2.15)

где

– ФАЛ, описывающая работу трёх из четырёх ДМ;

– ФАЛ для

системы ЖРД (два из трёх блоков);

– ФАЛ для ССКМ (два из трёх);

– логические переменные, описывающие условие работоспособности блоков ЖРД 1,2,3;

– логические переменные,

описывающие условие работоспособности ДМ 1,2,3,4;

–

логические переменные, описывающие условие работоспособности МС ССКМ 1,2,3. Запишем формулу (2.15) в виде ДНФ:

Так как

и

не содержат одинаковых переменных, эти функции можно рассматривать в виде независимых логических переменных и преобразовывать каждую ФАЛ в форму позволяющую перейти непосредственно к ВФ. Для преобразования ФАЛ воспользуемся алгоритмом ортогонализации [74]. Преобразуем полученную ДНФ к ортогональной дизъюнктивной нормальной форме (ОДНФ) пронумеровав её члены:

72

Преобразование ФАЛ к ортогональной ДНФ даёт возможность перехода к ВП:

, (2.16)

, (2.17)

, (2.18)

где Р

1

, Р

2

, Р

3

, Q1

, Q2

, Q3

, - вероятность работоспособности и вероятность отказа блоков ЖРД 1,2,3; Р

4

, Р

5

, Р

6

, Р

7

, Q4

, Q5

, Q6

, Q7

-

вероятность работоспособности и вероятность отказа блоков ДМ 1,2,3,4; Р

8

,

Р

9

, Р

10

, Q8

, Q9

, Q10

- вероятность работоспособности и вероятность отказа блоков МС 1,2,3 ССКМ.

Вероятностный полином обобщённой схемы необходим при работе ЭСХО, то есть для «грубой» ориентации КА, так как при реализации экстренной схемы не имеет значения на каких ИО осуществляется стабилизация («грубая» или «точная»). Для работы с использованием ОСХО или ДСХО для штатной работы КА рассмотрим только схему стабилизации

73

на ДМ. Функция алгебры логики для технической структуры подсистемы ИО

с ДМ имеет следующий вид:

Данную ФАЛ легко преобразовать в ВП:

(2.19)

Тогда из рассмотренных ранее вероятностных полиномов работоспособности для подсистемы ЧЭ и рассмотренных в этом подразделе вероятностных полиномов можно составить обобщённый полином работоспособности СУД.

Для «точной» ориентации полином, который находится по формуле:

,

а для режима №2:

.

С помощью данных полиномов можно определить значимые элементы контура управления угловым движением, тем самым уделить особое внимание ресурсу БА, которая является наиболее важной с точки зрения структурного построения контура управления угловым движением. Для режима неориентированный полёт не предусмотрено управление

угловым движением КА. Данный режим рассматривается только в рамках имитационного моделирования, однако, если рассматривать другие бортовые системы КА, то необходимо учитывать специфику их работы в режиме НП.

74

### 2.3 Аналитическая модель структурно-функциональной

реконфигурации СУД в рамках текущего режима ориентации

При восстановлении работоспособности КА в текущем режиме ориентации новое структурное состояние КА определяется только новой конфигурацией БА. Задача выбора новой рабочей конфигурацией БА может быть формализована в виде задачи математического программирования. Тогда аналитическая модель структурно-функциональной реконфигурации может быть описана в виде задачи дискретного программирования, где критерии выбора задаются и ограничения могут задаваться нелинейными функциями. Множеством альтернатив задачи является множество рабочих конфигураций БА при восстановлении текущего режима ориентации КА. В качестве ресурсных ограничений в данной модели могут выступать ограничения, отражающие энергетические, информационные, временные ресурсы. Основными ресурсными ограничениями в диссертационном исследовании будут являться ограничения по суммарному энергопотреблению и ограничения на время работы БА, её временной ресурс. Суммарное энергопотребление необходимое для БА

постоянно и

определяется на стадии проектирования КА. Оно зависит от ёмкости аккумуляторных батарей КА, характеристик панелей солнечных батарей и их освещённости в орбитальном полёте КА. Как правило, при оценке, потребляемой БА мощности не учитываются потенциальные сбои и отказы, потери ориентации, которые приводят к невозможности штатной работы системы электропитания (СЭП). Поэтому проектирование СЭП осуществляется «с запасом», что зачастую приводит к завышенным массовым характеристикам аккумуляторных батарей и солнечных панелей. Ограничение временной работоспособности БА определяется временным ресурсом. Оно задаётся заказчиком прибора и подтверждается разработчиком в процессе испытаний, в том числе лётных. При превышении суммарной наработки заданного временного ресурса, БА может остаться в работоспособном состоянии, но вероятность отказа, после которого прибор

75

уже не подлежит дальнейшему восстановлению, значительно возрастает. Основное внимание уделяется появлению внезапных сбоев при работе БА. Особенно это актуально для цифровой аппаратуры с электронными модулями, которые подвержены воздействию ТЗЧ и высокоэнергетических протонов космического пространства, а также иным факторам космического пространства [48].

Формально для задачи математического программирования рабочую конфигурацию БА можно представить конечномерным вектором , состоящим из булевых переменных

, которые

характеризуют задействование БА для контура управления угловым движением. Общее число возможных альтернатив оптимизационной задачи составит 2

N

, где N – общее число БА КА. Выбираемая рабочая конфигурация БА должна соответствовать работоспособной функциональной структуре СУД КА в заданном режиме ориентации. Данное ограничение можно представить следующим образом:

, где

– интегральный

показатель структурной надёжности (2.3), т.е. показатель структурной надёжности для синтезируемого нового структурного состояния , который должен принимать строго положительные значения, что соответствует работоспособности КА в заданном режиме ориентации при рабочей

конфигурации . Далее для задачи математического программирования данное ограничение будем записывать как

, имея в виду, что

используется полином, характеризующий функциональную структуру для режима

.

Максимизируя суммарное время работы КА, которое зависит от временного ресурса всей БА с учётом её сбоев и неопределённости момента возникновения отказа БА, будем на протяжении всего периода эксплуатации КА равномерно загружать БА с учетом их наработки на отказ. Тогда аналитическая модель реконфигурации может быть представлена следующим образом:

76

, (2.21)

, (2.22)

, (2.23)

где

– вероятностный

полином структурной надёжности СУД;

– мощность потребляемой электроэнергии рабочей конфигурацией БА ,

– допустимое суммарное энергопотребление на КА, с

– коэффициент расходования временного ресурса  $i$ -й БА,

,

- временной ресурс и текущая наработка  $i$ -го прибора.

С помощью критерия

обеспечивается

равномерный расход временного ресурса бортовой аппаратуры для максимизации общего времени работы КА.

Алгоритмы нахождения решения данной задачи математического программирования будут рассмотрены в разделе 3. Выбор рабочей конфигурации БА по вышеописанному критерию позволит перераспределять временной ресурс в пользу более равномерной загрузки БА, что приведёт к увеличению общей продолжительности времени нахождения СУД в работоспособном состоянии.

В перспективе решение задачи выбора конфигурации БА может использоваться не только для максимизации времени функционирования КА за счёт равномерной загрузки БА, но и для минимизации затрат других видов бортового ресурса в процессе эксплуатации: электроэнергии, топлива, информационных ресурсов и т.д. Также подобные задачи могут быть формализованы для других бортовых систем КА с учетом ограничений не только по энергопотреблению, но и ограничений по точности ориентации и

77

стабилизации, расходу топливного ресурса, скорости передачи

телеметрической и/или целевой информации.

Выводы

1. Для описания структуры СУД КА выбран общий логиковароятностный метод (ОЛВМ), как наиболее универсальный метод структурно-логического описания сложных систем. На основе ОЛВМ введены показатели для оценки структурной надёжности системы, а также для оценки значимости элементов системы в структурном построении.

2. Рассмотрен типовой состав бортовой аппаратуры СУД, его техническая структура в виде подсистемы чувствительных элементов и исполнительных органов. При этом обязательным критерием работоспособности является одновременная работоспособность двух подсистем. Описана функциональная структура каждой подсистемы с помощью трёх режимов ориентации КА.

3. Предложена аналитическая модель структурно-функциональной реконфигурация СУД в рамках заданного режима ориентации КА. Аналитическая модель представляет задачу дискретного программирования, т.е. выбора рабочей конфигурации БА по критерию равномерного распределения временного ресурса БА и ограничениям по величине показателей структурной надёжности и энергопотреблению.

4. Задача выбора рабочей конфигурации БА может быть формализована

не только для БА СУД, но и для других бортовых [66]

систем КА

с учетом различных критериев выбора и ограничений. Такой подход может служить основой для дальнейших исследований вопроса повышения автономного функционирования КА.

78

Раздел 3. Методика структурно-функциональной реконфигурации и алгоритмы решения задачи выбора рабочей конфигурации БА СУД

3.1 Стандартная реконфигурация СУД КА

Стандартная реконфигурация БА осуществляется БКУ совместно с НКУ и заключается в следующем. При обнаружении бортовой системой КА нештатной работы БА в ближайшем сеансе связи КА пересылает на средства НКУ соответствующие массивы информации о нештатной работе, которые исследуются специалистами группы анализа и управления. После выработки решения по восстановлению работоспособности вышедшей из строя БА, принимаются меры по «реанимации» КА, то есть разработка и закладка на борт необходимых рабочих программ (разовых команд), «перепрошивка» вычислительных средств КА на ближайших сеансах связи (СС). В случае повторения нештатной ситуации на борту КА восстановление работоспособности КА может происходить по уже отработанной схеме: по откорректированной документации в рамках лётных испытаний КА.

На интервале времени, начиная от блокировки штатного режима

функционирования КА средствами БКУ до восстановления работоспособности средствами НКУ, КА должен находиться в безопасном режиме, который исключает работу целевой аппаратуры и приборов, связанных с возникновением нештатной ситуации. Одним из вариантов такого режима может быть неориентированный полёт (НП) КА. Функционально НП можно рассматривать как режим, обеспечивающий минимальный уровень энергопотребления на борту КА, необходимую связь с НКУ, ориентацию панелей солнечных батарей достаточную для питания БА КИС (режим неориентированного полёта или ориентированного дежурного полёта в [4]). Режим НП также даёт возможность (дополнительное время) рабочей группе НКУ для анализа работы бортовых систем по телеметрической информации, при этом прекращается развитие нештатной ситуации (НС).

79

Безусловными плюсами такой реконфигурации являются своевременный контроль человеком (группой анализа и управления НКУ) возникающих на борту НС и реализация реконфигурации с привлечением «живого» интеллекта.

Однако следует отметить и недостатки такой реконфигурации. Впервых, невозможно осуществлять эксплуатацию КА по целевому

назначению в режиме НП, то есть потеря оперативности получения целевой информации. Во-вторых, КА требуется войти в СС, что приводит к незапланированной задержке в управлении. В-третьих, необходимо дополнительно задействовать ресурс НКУ даже при однотипных нештатных ситуациях, а в случае нештатной ситуации срыв выполнения сеанса управления КА по вине техники и/или персонала, может привести к неблагоприятному дальнейшему развитию НС. Другими словами, в реальных условиях выполнение мероприятий по реконфигурации бортовой системы занимает значительный интервал времени, вызванный отсутствием автоматизации рассматриваемого процесса управления. Как правило, решение этой задачи возлагается на операторов, физиологические ограничения которых делают их «узким» звеном при принятии ответственных решений.

Схематично реконфигурация бортовой системы КА представлена на рисунке 3.1, где

- момент возникновения нештатной ситуации;
- начало и конец первого после возникшей НС сеанса связи с НКУ, на котором фиксируется неисправность (сбой или отказ БА), ставшая причиной НС;
- начало и конец сеанса связи после возникшей НС, на котором закладывается соответствующая рабочая программа, задающая новую конфигурацию БА,
- момент перехода к штатному функционированию КА.

80

Рисунок 3.1 Проведение стандартной реконфигурации с задействованием НКУ  
При реконфигурации с задействованием НКУ функции БКУ могут сводиться:

- к идентификации неисправной БА;
- переводу КА в режим НП (аварийный, дежурный режим);
- парирование нештатных ситуаций путем переключение неисправной БА на работоспособную при наличии на борту соответствующего резерва.

В случае горячего резервирования однотипной БА какими, например, являются ОЗД, переход на работоспособные средства может осуществляться автоматически, согласно алгоритмам определения ориентации СУД [1].

Для решения задачи реконфигурации СУД КА в части подсистемы чувствительных элементов рассмотрено (подраздел 2.2.2) несколько СхО КА [43]:

Основная схема (ОСХО) – «точная» ориентация (для целевого функционирования КА);

Дополнительная (ДСХО) – «точная» ориентация;

Экстренная (ЭСХО) – «грубая» ориентация, которая предполагает минимальный состав ЧЭ, необходимый для ориентации антенных устройств КА на Землю.

81

Что касается исполнительных органов СУД, то рассмотрено два режима стабилизации:

- стабилизация на двигателях-маховиках (ДМ) и сброс кинетического момента с помощью ССКМ или с помощью ЖРД – «точная» ориентация;
- стабилизация на ЖРД без необходимости сброса кинетического момента – «грубая» ориентация.

В каждой схеме ориентации и каждом режиме стабилизации имеется структурный и функциональный резерв в виде идентичной или аналогичной

по своим функциям БА. То есть работа СхО может осуществляться и при выходе определённого числа БА. Однако, в зависимости от реализованного на борту КА программного обеспечения, а также схемно-технических решений, применяемых в БА (разработчиками приборов) процесс реконфигурации может происходить по нескольким сценариям:

- с полным задействованием НКУ для восстановления требуемой схемы ориентации (режима стабилизации) КА в случае неисправной работы;
- с частичным задействованием НКУ, для осуществления перехода между режимами ориентации КА;
- без задействования НКУ, когда КА автоматически (с помощью БКУ) переходит не только с неисправной БА на резервную работоспособную, но и при переходе между режимами ориентации КА с выбором подходящей рабочей конфигурации БА.

Автоматическая реконфигурация необходима для повышения автономности КА при возникновении неисправности БА. Роль НКУ в этом случае сводится к контролю протекающих на КА процессов. Таким образом, можно говорить о двух видах управления КА с реконфигурацией БА (рисунок 3.2): управление реконфигурацией при помощи НКУ и реконфигурация при помощи БКУ (автономное функционирование).

82

а) при помощи НКУ б) Автономное функционирование  
Рисунок 3.2 Технологии управления КА с реконфигурацией СУД  
Далее рассмотрим варианты реконфигурации СУД КА без задействования НКУ.

Для организации реконфигурации СУД без привлечения средств НКУ в БПО должны быть включены соответствующие алгоритмы перехода из неработоспособных состояний в работоспособные. В результате проведенного анализа (подразделы 2.3.1, 2.3.2) стандартная реконфигурация для рассмотренных ранее алгоритмов ориентации СУД (ОСхО, ДСхО, ЭСхО) может быть представлена в виде схем, изображенных на рисунках 3.3 - 3.5.

83

Рисунок 3.3 Стандартная реконфигурация для ОСхО

Здесь и далее под альтернативным режимом будет подразумеваться режим с новой схемой ориентации или режим неориентированного полёта (безопасный режим), в который может быть переведён КА. Выбор альтернативного режима зависит от логики управления КА. Переход к альтернативному режиму может осуществляться автоматически с помощью алгоритмов СУД или через команды с НКУ при осуществлении СС, непосредственно или с некоторой временной задержкой. Для альтернативного режима в качестве новой схемы ориентации может выступать новый алгоритм ориентации (стабилизации) СУД, загруженный с НКУ в бортовое ЗУ в результате управления при нештатной ситуации и не предусмотренный при проектировании КА.

84

Рисунок 3.4 Стандартная реконфигурация для ДСхО

Как видно из схем на рисунках 3.3-3.5 данные алгоритмы не рассматривают подсистему ЧЭ как целостную структуру, переключение БА осуществляется на резервные комплекты поочередно. При этом в алгоритмах не учитывается текущее состояние и скорость расхода бортового ресурса при реализации требуемого режима ориентации КА, что может привести к нерациональному задействованию БА и расходу электроэнергии КА. Также стоит отметить, что стандартная реконфигурация не предполагает масштабирования подсистемы ЧЭ, так как добавление нового элемента ведёт к полному перестроению логики алгоритма.

85

Рисунок 3.5 Стандартная реконфигурация для ЭСхО

Для режимов стабилизации алгоритм стандартной реконфигурации строится аналогично схемам ориентации: проверяются по порядку ДМ-1, 2, 3, 4, ЖРД блоки 1,2,3, МС1, МС2, МС3 ССКМ. Основные приборы СУД для поддержания штатной ориентации – это ДМ и ЖРД, поэтому если ни один из режимов стабилизации не выполняется, то КА переходит к режиму неориентированного полёта (безопасный режим) [55]. Если же работают ДМ, то КА функционирует в режиме «точной» ориентации, если же работают ЖРД (при отказавших ДМ) – в режиме «грубой» ориентации.

86

Дополнительно следует отметить, что трудность автоматизации стандартной реконфигурации заключается в отсутствии критериев перехода между режимами ориентации КА. То есть при переходе между структурными состояниями КА также придётся задействовать НКУ.

Таким образом, относительно стандартной реконфигурации СУД можно указать на следующие ее особенности, которые будут оказывать негативное влияние на функционирование КА:

- не осуществляется анализ состояния бортового ресурса КА, что могло бы увеличить общее время функционирования КА по целевому назначению при рациональном его использовании;

- отсутствуют критерии перехода между структурными состояниями КА: критерии выбора режима ориентации КА и рабочей конфигурации БА. Однако эти особенности учитываются при «ручном» управлении с наземного сегмента космической системы, т.е. с привлечением «живого» интеллекта к управлению структурной динамикой КА. С другой стороны, актуален вопрос автономного функционирования КА различного назначения, когда по тем или иным причинам невозможно управлять КА с помощью НКУ: нахождение КА вне зон радиовидимости (ЗРВ), невозможность работы технических средств НКУ из-за внешнего воздействия (диверсия, целенаправленная атака, сбой в системе), одноточечная или малоточечная схема управления КА и ряд других причин.

### 3.2 Методика структурно-функциональной реконфигурации СУД КА

Для устранения указанных негативных особенностей стандартной реконфигурации, рассмотрим методику проведения структурнофункциональной реконфигурации СУД, которую можно реализовать на

борту КА с привлечением собственных вычислительных средств.

Предлагаемая методика структурно-функциональной реконфигурации СУД КА включает в себя следующие шаги:

87

Шаг 0. Локализация нештатной ситуации: определение сбоившей аппаратуры и вывод её из контура управления углового движения КА.

Шаг 1. Анализ работоспособности БА. Попытка восстановления работы КА в текущем режиме ориентации с новой рабочей конфигурации БА СУД.

Шаг 2. Если включение необходимой конфигурации БА для текущего режима невозможно, то переход к альтернативному режиму без потери выполняемых КА функций, т.е. альтернативному штатному режиму.

Включение рабочей конфигурации БА для альтернативного штатного режима.

Шаг 3. Если включение рабочей конфигурации БА для альтернативного режима ориентации невозможно, то осуществляется переход на режим с пониженной эффективностью (перевод КА в частично работоспособное состояние). Производится поиск рабочей конфигурации БА для режима ориентации с пониженной эффективностью.

Шаг 4. Если включение рабочей конфигурации БА для режима ориентации с пониженной эффективностью также невозможно, то КА переводится в режим НП. Вывод КА из режима НП осуществляется по командам с НКУ.

Шаг 5. После вывода КА из режима НП, анализируется состояние БА. Если сбоившая ранее аппаратура была восстановлена, то производится поиск рабочей конфигурации БА для режима ориентации обеспечивающего выполнение штатных функций КА, в противном случае для альтернативного режима с пониженной эффективностью.

Шаг 6. Через заданное время вычислительными средствами КА анализируется состояние БА и текущий режим ориентации. Если КА функционирует в режиме с пониженной эффективностью, то осуществляется поиск рабочей конфигурации для режима, обеспечивающего выполнение штатных функций КА. Если конфигурация была найдена, то осуществляется восстановление работоспособности КА.

88

Таким образом, данный комплекс мероприятий предусматривает восстановление работоспособности КА при возникновении сбоев и отказов БА и осуществляет перевод КА на альтернативные режимы функционирования. Основным критерием перевода на альтернативный режим является наличие рабочей конфигурации БА для текущего режима. Прокомментируем содержание вышеописанных шагов на примере схем ориентации и режимов стабилизации, рассмотренных в разделе 2.

Для режима «точной» ориентации может быть выбрана одна из схем ориентации: основная или дополнительная, и режим стабилизации на двигателях-маховиках. При выходе из строя трёх звёздных датчиков в ОСХО можно использовать ДСХО с одним звёздным датчиком и одним прибором ориентации по Земле. Переход к «грубой» ориентации (т.е. режиму с пониженной эффективностью), производится, если два ДМ вышли из строя или, например, в приборах ИУС вышли из строя два ВОГ. В этом случае работа в «точном» режиме невозможна из-за отсутствия прецизионной схемы ориентации. Тогда осуществляется поиск рабочей конфигурации либо для режима со стабилизацией на управляющих ракетных двигателях (в случае отказа ДМ), либо для режима с экстренной схемой ориентации (в случае отказа измерительных каналов ВОГ прибора ИУС).

Таким образом, очевидно, что ядром предложенной методики по проведению структурно-функциональной реконфигурации является задача выбора рабочей конфигурации БА, описанная в разделе 2. Алгоритмы решения данной задачи представлены далее в подразделе 3.3.

### 3.3 Алгоритмы решения задачи выбора рабочей конфигурации БА

#### 3.3.1 Общий подход к решению задачи выбора рабочей конфигурации



БА

Для выбора рабочей конфигурации БА требуется решить задачу математического программирования (2.21) – (2.24), представленную в разделе 2. Область допустимых вариантов рабочих конфигураций БА

89 задаётся ограничениями (2.22) – (2.24). Ограничение (2.22) учитывает структурное построение СУД, где

– условие работоспособности СУД для технической состояний с выбранной рабочей конфигурации БА в заданном режиме ориентации КА,

– вероятностный полином структурной надежности СУД для заданного режима ориентации КА. Ограничение (2.23)

учитывает энергопотребление конфигурации БА, где

– мощность потребляемой электроэнергии рабочей конфигурацией БА (см. раздел 2).

Задачу математического программирования (2.21) – (2.24) предлагается решать следующим образом. Сначала генерируем множество альтернатив, удовлетворяющих ограничениям задачи (2.22), (2.23), затем выбираем из полученного множества альтернатив наилучшую альтернативу по критерию (2.21) равномерной загрузки БА с учётом их наработки на отказ.

Отметим, что коэффициенты целевой функции с отражают

расход временного ресурса  $i$ -й БА, т.е. чем больше  $c_i$ , тем меньше по времени

была задействована  $i$ -я БА к моменту её включения в рабочую конфигурацию. Предыстория функционирования соответствующей БА учитывается в имитационной модели. При этом значение критериальной функции становится тем больше, чем большее количество БА с неизрасходованным временным ресурсом включается в рабочую конфигурацию БА.

Процесс генерации (построения) рабочих конфигураций БА в заданном режиме ориентации КА осуществляется из условия работоспособности контура управления угловым движением.

Введём в рассмотрение некоторое текущее состояние КА

, для которого определяется вектор рабочей конфигурации БА

. Оценка

90

структурной надёжности для данного состояния вычисляется по следующей формуле:

.

Если

, то состояние

считается неработоспособным. Тогда

требуется выбрать и ввести в структуру СУД необходимую работоспособную бортовую аппаратуру. Новое состояние будет характеризоваться вектором

, где

– вектор, соответствующий

включению некоторой исправной  $j$ -й БА в контур управления угловым движением КА, – оператор булева сложения. Если после ввода  $j$ -й БА состояние

останется неработоспособным

, то процесс

формирования рабочей конфигурации БА следует продолжить. В противном случае

) процесс завершается.

Примем за начальное состояние КА

такое, когда ни одна БА не

включена в рабочую конфигурацию СУД (т.е.

). Тогда сценарий включения элементов в структуру СУД можно

представить следующей последовательностью

.

При формировании указанной последовательности главная задача

состоит в выборе очередной БА из числа работоспособной.

Для текущего состояния

каждое работоспособная и не включённая в конфигурацию

$j$ -я БА, характеризуется структурной значимостью

(формула (2.7) из раздела 2)

, где

отражает суммарный вклад данного элемента в структурную надежность для контура управления угловым движением КА с учетом уже включенных элементов.

Задачу выбора БА для включения в рабочую конфигурацию будем

решать с помощью двух подходов. Это эвристический подход основе «жадного» алгоритма, где на каждом шаге выбирается элемент (БА) с

91 максимальной структурной значимостью, и бионический подход на основе алгоритма случайного направленного поиска, где осуществляется построение серии квазиоптимальных вариантов конфигураций БА, а также рассмотрим комбинации этих подходов.

3.3.2 Эвристический подход на основе «жадного» алгоритма

Суть данного подхода заключается в том, что при итерационном приближении к глобальному оптимуму на каждом шаге выбирается оптимальная альтернатива для данного шага. Однако, поиск глобального оптимума, организованный таким образом, может дать результат с существенным отклонением от конечного оптимального решения [68]. На каждой к-й итерации выбор «восстанавливаемого» элемента среди работоспособных БА осуществляется по следующему правилу:

то есть выбирается элемент с максимальной значимостью. Не умоляя общности, можно считать, что для неработоспособной БА значимость элемента равна нулю.

Предложенный подход можно реализовать в виде алгоритма, состоящего из следующих шагов:

Шаг 0. Исходное состояние.

[1]

Шаг 1. писк значимости для «восстанавливаемых» и исправных элементов структуры. Формируем полином из исходного полинома характеризующего работу СУД  
 . Вычисляем значимости для работоспособных элементов , соответствующих нулевым позициям в векторе  
 . Значимости элементов вычисляются с использованием полинома

Шаг 2. Выбор «восстанавливаемого» элемента.

92

Шаг 3. Формируем вектор рабочей конфигурации  $B$  .  $k ::= +1$  , где

Шаг 4. анализ работоспособности для конфигурации  
 . Если , то переход на шаг 1. Иначе если , переход на шаг 5.

Шаг 5. Формирование вектора рабочей конфигурации. Сохраняем вектор рабочей конфигурации БА , выход из алгоритма.

Далее в п. 3.3.4 будут рассмотрены дополнительные шаги к вышеизложенному алгоритму, которые позволят сформировать множество альтернатив и осуществить проверку ограничений по энергопотреблению.

3.3.3 Бионический подход на основе алгоритма случайного направленного

поиска

Важнейшим направлением теории поисковой оптимизации является теория случайного поиска, впервые предложенная в 1959 году Л.А. Растригиным [73]. В последующие годы случайный поиск самым широким образом используется в различных областях науки и техники – от оптимального проектирования конкретных технических систем до проблем создания общей теории поиска.

Начиная с 70-х гг. получило довольно широкое распространение одно из направлений теории поисковой оптимизации, связанное с методологией синтеза новых алгоритмов на базе бионических представлений:

эволюционный подход, «эволюционное моделирование», эволюционная глобальная оптимизация, «эволюционная стратегия», «генетическая адаптация», «генетические алгоритмы» и тому подобное.

Сущность метода случайного поиска [1]

для задачи выбора рабочей конфигурации БА состоит в повторяющихся испытаниях. Для каждого испытания будем получать рабочую конфигурацию БА следующим образом. При построении рабочей конфигурации, каждый следующий элемент включаемый в конфигурацию БА будет выбираться случайным образом по

93

специальному правилу, в отличие от предыдущего подхода, где выбирался элемент с максимальной значимостью. Для вектора рабочей конфигурации БА

сформируем список значимостей причём  
 . Для осуществления

поиска интервал  $[0,1]$  разбивается на подынтервалы так, что координаты концов подынтервалов образуют последовательность  
 , где

,

Здесь, чем меньше [\[1\]](#)

значимость элемента в структурном построении, тем меньше

длина подынтервала отводится этому элементу, т.е. меньшим подынтервалом «поощряется»  $j$ -й элемент.

Для случайного выбора [\[1\]](#)

включаемого элемента генерируется случайное число , распределённое по равномерному закону на интервале  $[0,1]$ ,

которое попадает в некоторый подынтервал и тем самым определяет выбор «восстанавливаемого» элемента. Таким образом, в соответствии с построенной вероятностной гипотезой организуется поиск глобального экстремума, причём в окрестности глобального экстремума плотность случайно выбираемых траекторий «[\[1\]](#)

восстановления» будет наибольшей. Алгоритм для вышеизложенного подхода возможно реализовать в следующем виде:

Шаг 0. Начальные условия для алгоритма. Задаём число статистических испытаний  $M$ ,  $m=0$  – число полученных альтернативных конфигураций БА.

Шаг 1. Исходное состояние, начало очередного испытания.

.

Шаг 2. список значимости для «восстанавливаемых» и исправных элементов структуры. Формируем полином из исходного полинома характеризующего работу СУД

. Вычисляем значимости для работоспособных элементов

94

, соответствующих нулевым позициям в векторе . Значимости элементов вычисляются с использованием полинома

.

Шаг 3. случайный выбор «восстанавливаемого» элемента. В соответствии со списком значимостей элементов структуры формируем подынтервалы на интервале  $[0;1]$ ; генерируется случайное число .

Выбираем , исходя из

.

Шаг 4. Формируем вектор рабочей конфигурации  $B$  .  $k::=+1$ , , где

,

Шаг 5. анализ работоспособности для вектора конфигурации

.

Если , то переход на шаг 2.

Если , тогда сохраняем рабочую конфигурацию  $M::=-1$  и  $m::=+1$ . При этом если  $M<0$ , тогда выход из алгоритма, иначе переход на шаг 1.

В результате проведения заданных  $M$  испытаний для алгоритма адаптивной поисковой оптимизации получим множество альтернатив состоящее из  $m$  элементов. Из данного множества выберем альтернативы удовлетворяющие ограничению на энергопотребление

### 3.3.4 Комбинированный подход на основе «жадного» алгоритма

Чтобы сформировать множество альтернатив по аналогии с алгоритма случайного направленного поиска для «жадного» алгоритма необходимо провести серию испытаний, где при каждом последующем испытании возможно построение новой рабочей конфигурации БА. Так как в контур управления угловым движением КА входят элементы, имеющие одинаковое значение структурной значимости (т.е. эквивалентные с точки зрения структурного построения), то процессе итерационного формирования вектора конфигурации возникает неоднозначность в выборе элемента с максимальной значимостью (структура может иметь несколько таких

элементов). В результате выбор элемента можно осуществлять случайным образом.

Тем самым, предлагается комбинировать ранее рассмотренные алгоритмы. Пошаговая реализация комбинированного алгоритма будет являться модификацией предыдущего алгоритма (рассмотренного в 3.3.2) за счёт изменения Шага 3 на Шаг 3а и Шаг 3б:

Шаг 3а. Выбор «восстанавливаемого» элемента. Выбираем элементы с максимальной значимостью

– (mх – количество элементов с максимальной значимостью).

Шаг 3б. Выбор единственного элемента.

Если , то элемент выбирается случайным образом.

По завершению алгоритма формируем множество альтернатив, из которого выбираются альтернативы удовлетворяющие ограничению

#### Выводы

В заключение раздела можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотрены алгоритмы стандартной реконфигурации СУД КА. Выявлены основные их недостатки, к которым, в первую очередь, следует отнести отсутствие учёта состояния и расхода бортового ресурса КА при реализации заданного режима ориентации.
2. Проведён анализ процесса реконфигурации СУД КА. Были выделены три типа управления структурной динамикой на борту КА в зависимости от роли НКУ: проведение реконфигурации СУД по командам с НКУ, частичное задействование НКУ для реконфигурации СУД, автоматическая реконфигурация СУД проводимая при помощи собственных вычислительных средств БКУ. Наиболее предпочтительной с точки зрения автономного функционирования КА является автоматическая реконфигурация СУД.

96

3. Предложена методика проведения структурно-функциональной реконфигурации СУД, осуществляемая в автоматическом режиме на борту КА. На основе рассмотренной в подразделе 2.5 задачи осуществляется выбор рабочей конфигурации БА для текущего режима ориентации КА. С помощью данной методики при проведении структурно-функциональной реконфигурации СУД учитываются ресурсные ограничения на борту КА и осуществляется оперативное перераспределение функций между БА, что не всегда удаётся даже при «ручном» управлении.

4. Для решения задачи выбора рабочей конфигурации БА разработаны соответствующие алгоритмы на основе эвристического и бионического подхода с применением «жадного» алгоритма и алгоритма случайного направленного поиска. Рассмотренные ранее в разделе 2 (ОЛВМ) показатели оценки структурной надёжности системы и значимости элементов системы в структурном построении играют важную роль в разработанных алгоритмах. Выбор рабочей конфигурации БА осуществляется по критерию равномерной временной загрузки БА с учётом ограничения на энергопотребление.

97

Раздел 4 Разработка и исследование прототипа программного комплекса моделирования реконфигурации СУД КА

#### 4. 1 Структурно-логическая схема проводимых исследований прототипа программного комплекса

Одними из наиболее эффективных методов исследования сложных систем и процессов являются методы имитационного и комплексного моделирования. В связи с чем, в рамках данной диссертационной работы разработан прототип аналитико-имитационного ПК моделирования реконфигурации СУД КА – «Реконфигурация».

Данный ПК предназначен для решения задач автоматизированного анализа, оценивания и прогнозирования эффективности функционирования КА на основе применения моделей и алгоритмов реконфигурации СУД КА, разработанных в разделах 2 и 3. В качестве основных показателей

эффективности функционирования КА будем использовать:

- 1) количество проведённых сеансов целевой аппаратуры КА;
- 2) время работы КА по целевому назначению;
- 3) время работы КА по передаче информации на наземные средства;
- 4) объём переданной информации на наземные средства.

Также будут вычисляться значения комплексных показателей надёжности для оценки качества функционирования КА: коэффициент технического использования и коэффициент сохранения эффективности. На рисунке 4.1 представлена структурно-логическая схема проведения моделирования с помощью прототипа ПК «Реконфигурация».

98

Рисунок 4.1 Структурно-логическая схема проведения моделирования  
Для моделирования функционирования КА с учётом структурной динамики, необходимо задать исходные данные, которые можно условно разделить на три группы. Исходные данные первой группы характеризуют начальное состояние КА и характеристики БА:

- запас бортового ресурса КА (допустимое энергопотребление, временной ресурс БА);
- начальный режим функционирования КА и начальная рабочая конфигурация БА.
- статистические характеристики для моделирования сбоев и временной ресурс БА.

Ко второй группе относятся исходные данные, связанные с порядком функционирования КА:

- характеристики взаимодействия КА и технических средств (ТСр) ОКИК: географическое положение ТСр, предельная дальность связи ТСр с

99

КА и их минимальный угол места, режимы ориентации, при которых осуществляется связь КА с НКУ для передачи целевой информации и получение с НКУ команд управления;

- условия проведения сеансов целевой аппаратуры;
  - описание возможных схем ориентации (режимов стабилизации) СУД.
- К третьей группе относятся начальные условия по орбитальному движению КА.

Для одинаковых начальных условий проводится ряд экспериментов для различных вариантов реконфигурации СУД (см. раздел 3):

- стандартная реконфигурация с полным задействованием НКУ;
- стандартная реконфигурация, проводимая автоматически на борту КА (с задействованием НКУ для вывода КА из НП);
- структурно-функциональная реконфигурация, проводимая автоматически на борту КА (с задействованием НКУ для вывода КА из НП).

Анализ результатов моделирования заключается в оценке показателей эффективности функционирования КА и его технического состояния.

Анализируемая информация представлена в виде графиков:

- количества сеансов целевой аппаратуры и объёма переданной на наземные средства информации;
- режимов ориентации КА;
- состояния БА (текущая рабочая конфигурация и работоспособность БА).

После анализа результатов моделирования проводится серия дополнительных экспериментов с изменёнными исходными данными в части временных характеристик БА. Приводятся сравнительные таблицы, отражающие влияние характеристик отдельных структурных элементов (БА) контура управления угловым движением СУД на эффективность функционирования КА в целом.

100

#### 4. 2 Комплекс моделей, описывающих функционирование КА

Комплекс моделей, описывающих функционирование КА, состоит из следующих имитационных моделей:

- модель орбитального движения КА;
- модель взаимодействия КА с наземными средствами НКУ (передача массивов целевой информации и телеметрии, приём управляющих команд и программ);
- модель работы бортовой аппаратуры КА (моделирование сбоев и отказов, расхода временного ресурса БА, режимов ориентации, работы КА по целевому назначению).

Далее приведем описание указанных моделей и представим используемые исходные данные (ИД) для моделирования процесса функционирования КА.

##### 4.2.1 Модель орбитального движения КА

Точность описания движения КА на орбите зависит от степени учёта влияния гравитационных аномалий. Геопотенциал обычно рассматривается в виде [56]:

ан

(4.1)

где

– потенциал Земли, рассматриваемый как центральное тело;

ан

–

аномалии геопотенциала, определяющие отличие реального геоида от центрального тела.

Для рассматриваемой задачи реконфигурации СУД КА достаточно будет пользоваться приближением

, откуда имеем, что

дифференциальное уравнение движения КА в общем виде выражается формулой:

, (4.2)

где – произведение гравитационной постоянной на массу Земли

(

**[74]**

км

3

/с

2

); – расстояние от КА как материальной точки до

101

центра Земли. В геоцентрической инерциальной системе координат дифференциальные уравнения запишутся следующим образом:

и

и

,

и

и

,

и

и

, (4.3)

где X

и

, Y

и

, Z

и

– координаты КА в ИСК.

Для численного интегрирования система второго порядка приводится к системе дифференциальных уравнений первого порядка введением дополнительных функций. Пусть Y

1= X

и

, Y

3= Y

и

, Y

5= Z

и

, тогда система

дифференциальных уравнений можно записать в следующем виде:

(4.4)

где

.

Систему дифференциальных уравнений можно представить в векторном виде:

.

Согласно методу Рунге-Кутты 4-го порядка последовательные значения искомой функции

на (k+1) шаге определяются по формуле:

, (4.5)

где

. Коэффициенты

находятся из выражений:

и

и

и

102

и

и

и

и

где  
и

– шаг интегрирования, выбранный для конкретной задачи. Далее, приняв

за исходные данные, вычисления приращения векторфункции повторяются. Таким образом, с помощью данных уравнений мы можем находить баллистический вектор состояния КА на каждый момент времени, что необходимо для оценки зон радиовидимости.

4.2.2 Модель взаимодействия с НКУ и условия работы целевой аппаратуры

Моделирование взаимодействия КА с наземными техническими средствами НКУ будет осуществляться исходя из следующих соображений.

Имея географические координаты отдельного командно-измерительного комплекса (ОКИК) НКУ ( $\varphi$  - широта и  $\lambda$  - долгота), можно найти радиусвектор ОКИК в Гринвичской системе координат (ГСК)

:  
,  
,  
,  
где

– радиус Земли. Радиус-вектор КА в ГСК можно выразить как

, где

– матрица перевода координат из ИСК в ГСК,

– радиус-вектор в ИСК, который вычисляется в модели орбитального движения на каждый момент времени. Данные вектора необходимы для нахождения текущей дальности от ОКИК до КА

, а также  
угол места

(угол между плоскостью горизонта и радиус-вектором от ОКИК до КА). Зададим в исходных данных ограничения на вхождения КА в связь с техническими средствами НКУ (исходные данные по характеристикам технических средств НКУ): дальность

и  
минимальный угол места

. Радиус-вектор от ОКИК до КА находим для

ГСК:

. (4.6)

103

Текущее значение дальности от ОКИК до КА и угла места будем находить как:

- модуль радиус-вектора от ОКИК до КА:

;

- угол с плоскостью горизонта и радиус-вектором от ОКИК до КА:

. (4.7)

Тогда при соблюдении условий

и

КА сможет

выйти на связь с техническими средствами заданного ОКИК для получения команд на реконфигурацию, а также передачи сохранённой информации.

Целевое применение КА будет заключаться в азимутальном наблюдении за всей земной поверхностью. При этом работа целевой аппаратуры будет разбита на участки фиксированной временной длины

. Максимальное время работы целевой аппаратуры, связано с организацией целевого функционирования КА, перерывы в работе целевой аппаратуры связаны с отсутствием штатной ориентации.

На борту КА имеется специальное запоминающее устройство, в котором сохраняется полученная целевая информация. Пакет данных, формируемый для одного сеанса, объёмом записывается целиком в

специальное запоминающее устройство и также по пакетам пересылается на средства НКУ. Скорость канала передачи целевой информации

, объём

пакета данных сеанса

, длина временного интервала

задаются как

исходные данные в ПК для моделирования работы КА по целевому назначению.

4.2.3 Имитационная модель работы БА СУД

Рабочая конфигурация БА СУД описывается вектором рабочей конфигурации

, где - это модельное время.

Изменение вектора может происходить вследствие проведения реконфигурации СУД. Примем допущение, что идентификация неисправной

104

БА происходит автоматически. Для каждого -й БА будет задаваться время сбоя и время восстановления после сбоя:

сб

ср

сб

,

вост

сб

вост

,

где

ср

,

сб

,

вост

– средняя наработка между отказами -й БА, средняя остаточная наработка на отказ -й БА, среднее время до восстановления -й БА соответственно,

- случайные значения распределённые по нормальному закону. Тогда на компоненты вектора рабочей конфигурации с помощью имитационной модели накладываются ограничения:

сб

и

вост

, (4.8)

То есть в промежутки времени

сб

и

вост

невозможно включить  $i$ -ю

БА в состав рабочей конфигурации СУД.

Нумерация элементов вектора определена следующим образом:

1. Оптический звёздный датчик (ОЗД) №1
2. ОЗД №2
3. ОЗД №3
4. ОЗД №4
5. Прибор ориентации по Земле (ПОЗ) №1
6. ПОЗ №2
7. Волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) №1 прибора измеритель угловой скорости (ИУС) №1
8. ВОГ №2 прибора ИУС №1
9. ВОГ №3 прибора ИУС №1
10. ВОГ №4 прибора ИУС №1
11. ВОГ №1 прибора ИУС №2
12. ВОГ №2 прибора ИУС №2
13. ВОГ №3 прибора ИУС №2
14. ВОГ №4 прибора ИУС №2
- 105
15. Электромагнит (ЭМ) №1 системы сброса кинетического момента (ССКМ)
16. ЭМ №2 ССКМ
17. ЭМ №3 ССКМ
18. Двигатель-маховик (ДМ) №1
19. ДМ №2
20. ДМ №3
21. ДМ №4
22. Блок №1 жидкостных ракетных двигателей (ЖРД)
23. Блок №2 ЖРД
24. Блок №3 ЖРД

После возникновения нештатной ситуации, работоспособность СУД определяется из условия:

и

и

, (4.9)

где

,

и

,

– логические функции работоспособности СУД: подсистемы ЧЭ, подсистемы ИО. Подробно логические функции

и

,

для

каждого режима ориентации КА описаны в п. 2.3.2 и 2.3.3.

Если суммарная наработка некоторой  $i$ -й БА в процессе моделирования превысила заданное (в ИД) значение его временного ресурса, тогда БА



считается отказавшей, то есть не подлежащей восстановлению. Временной ресурс -й БА будем обозначать

. Значения

ср

,

сб

,

вост

,

для БА задаётся

в первой группе ИД.

Энергопотребление на борту КА зависит от состава рабочей конфигурации БА. Каждая БА из состава рабочей конфигурации обладает своими характеристиками по энергопотреблению. Для ИУС, имеющего несколько измерительных каналов ВОГ, работающих комбинированно, энергопотребление определяется с учётом блока электроники прибора, отвечающего за обмен с БВС, и количества включенных ВОГ. Суммарное энергопотребление ИУС рассчитывается как сумма энергопотребления

106 работающих ВОГ и блока электроники, отвечающего за информационный обмен с данными ВОГ.

4.2.4 Исходные данные для проведения моделирования функционирования КА

Для проведения вычислительных экспериментов с применением разработанного ПК «Реконфигурация» необходимо задать следующие ИД:

1) начальная рабочая конфигурация БА, то есть задаётся вектор

;

2) структура СУД для каждого режима ориентации КА в виде логических функций и/или полиномов структурной надёжности;

3) бортовой ресурс КА в целом (по энергопотреблению) и временной ресурс БА

;

4) статистические характеристики сбоев БА

ср

,

сб

,

вост

;

5) географическое положение ( $\varphi$  и  $\lambda$ ) для каждого ОКИК, участвующего в управлении и информационном взаимодействии с КА;

6) характеристики ТСр ОКИК (допустимая дальность связи и

угол места

);

7) орбита и начальное положение КА (высота апогея  $h$

$a$

и перигея  $h$

$p$

,

наклонение орбиты  $i$ , долгота восходящего узла  $\Omega$ , аргумент перицентра  $\omega p$

,

истинная аномалия

);

8) параметры целевого функционирования (время сеанса целевой аппаратуры

, объём данных, записываемых в ЗУ на борту за один сеанс

, скорость канала передачи целевой информации

, объём ЗУ на борту

КА

).

4.3 Прототип программного комплекса для моделирования функционирования КА

Комплекс моделей может рассматриваться как программный образ концептуальной модели, определённый на одном из высокоуровневых

107 объектно-ориентированных языков программирования. Для вышеназванной концептуальной модели был выбран объектно-ориентированный язык программирования C++. Графический интерфейс прототипа разрабатывался в интегрированной среде программирования Borland C++ Builder [70]. На этапе проектирования прототипа ПК «Реконфигурация» была предложена следующая структура комплексной модели функционирования КА (рисунок 4.2).

Рисунок 4.2 Структура комплексной модели функционирования КА  
В соответствии с предложенной структурой комплексной модели,

прототип ПК «Реконфигурация» включает следующие программные модули:

а) Модуль Баллистика (Ballistica.cpp) содержит соответствующий класс Ballistica, выполняющий функции:

- расчёт признака вхождения КА в зону радиовидимости технического средства ОКИК НКУ;
- расчёт текущего вектора состояния КА в ИСК и ГСК;
- расчёт трассы КА;

б) Модуль БКУ (BKU.cpp) содержит два класса – бортовая аппаратура (BoardDevice) и бортовой комплекс управления (BoardSystemControl), которые выполняют следующие функции:

- моделирование работы БА КА (с учётом энергопотребления, среднего времени бессбойной работы, среднего полуинтервала сбоя, среднего времени восстановления БА);

108

- моделирование структурной динамики СУД КА;
- переключение режимов ориентации КА;
- работа алгоритмов реконфигурации СУД КА.

в) Основной модуль-форма (MainForm.cpp) обеспечивает графическое сопровождение процесса моделирования и выполняет функции:

- отображения графиков, характеризующих основные характеристики функционирования КА;
- нанесения трассы полёта КА на карту;
- обеспечение ввода исходных данных для моделирования;
- организация совместной работы модуля Баллистика и модуля БКУ.

Форма ПК «Реконфигурация» для отображения результатов моделирования, а также для ввода ИД представлена на рисунках 4.3, 4.4.

Рисунок 4.3 Главная форма ПК «Реконфигурация»

109

Рисунок 4.4 Форма ПК «Реконфигурация» для ввода ИД

4.4 Иллюстрация работы алгоритмов выбора рабочей конфигурации БА

Продемонстрируем работу алгоритмов выбора рабочей конфигурации БА на примере системы, состоящей из семи элементов.

Структура системы представляет два блока: по четыре и по три элемента. Работоспособность всей системы – это работоспособность двух блоков. Условия работоспособности первого блока – работоспособны не менее двух любых элементов из четырёх, работоспособность второго блока – работоспособны не менее двух любых элементов из трёх. Работоспособность рассматриваемой системы можно записать в виде логической функции:

, которую преобразуем в вероятностный полином:

(4.9)

Каждый элемент (БА) имеет ряд атрибутов:

- время безотказной работы
- ;
- отработанное время
- ;
- энергопотребление
- .

110

Исходные данные заданы в виде таблицы 4.1.

Таблица 4.1 Время безотказной работы и энергопотребление БА

БА №1 БА №2 БА №3 БА №4 БА №5 БА №6 БА №7

, час 800 600 500 900 1100 500 1300

, Вт 25 21 20 27 25 19 25

Атрибут

зависит от модельного времени

и характеризует время,

которое БА находилось во включённом состоянии.

Введём ограничение по суммарному энергопотреблению для включаемых в структуру элементов - 97 Вт. Тогда задача математического программирования будет представлена следующим образом:

, (4.10)

(4.11)

(4.12)

где

– оценка структурной надёжности системы, вычисляемая по формуле:

.

Допустим, что причиной возникновения нештатной ситуации стал отказ БА №6 в момент времени

ч. При этом изначально в

конфигурацию БА были включены: №1, №2, №5, №6. Для такой конфигурации

и структурная

надёжность для такой конфигурации:

.  
Из-за отказа БА №6 система не является работоспособной ( ). Таким образом, возникает необходимость проведения реконфигурации в целях восстановления работоспособности системы. С учётом того, что продолжительность работы БА №6 превышает гарантированное время безотказной работы

, будем считать его отказ фатальным, а БА не

111

подлежащим восстановлению. На момент времени  $t$  целевая функция принимает вид:

,  
ограничения по энергопотреблению:

.  
вероятностный полином при условии фатального отказа БА №6:

.  
Рассмотрим алгоритмы, предложенные в 3.3.1, 3.3.2 для следующей задачи математического программирования:

,  
.

«Жадный» алгоритм.

Для упрощения при иллюстрации данного алгоритма в случае неоднозначности выбора элемента с максимальной значимостью будем выбирать первый по порядку элемент. Конфигурация БА не задана. Не работоспособно средство №6, поэтому не учитываем его при построении новой конфигурации.

Итерация №1: вычислим значимость для потенциально работоспособной БА (т.е. кроме БА №6), используя полином (4.9) для которого

:

БА № 1 2 3 4 5 7

$\xi$  0,09375 0,09375 0,09375 0,09375 0,34375 0,34375

112

Элементы с максимальной значимостью – 5 и 7. Выбираем первый по порядку – 5. Модифицируем вероятностный полином с учётом

. Индексы элементов вектора

соответствуют

порядковому номеру БА в системе.

Итерация №2: вычислим значимость для всех потенциально

работоспособных БА, используя полином

, кроме БА №5:

БА № 1 2 3 4 7

$\xi$  0,1875 0, 1875 0, 1875 0, 1875 0,6875

По тому же принципу выбираем элемент – 7.

. Модифицируем ВП:

Итерация №3: вычислим значимость для всех потенциально

работоспособных БА, используя полином

, кроме БА № 5 и 7:

БА № 1 2 3 4

$\xi$  0,375 0, 375 0, 375 0, 375

Все элементы имеют одинаковую значимость, выбираем элемент – 3.

Модифицируем ВП:

Итерация №4: вычислим значимость для всех потенциально

работоспособных БА, используя полином

, кроме БА № 1,5 и 7:

БА № 2 3 4

$\xi$  0, 25 0, 25 0, 25

Выбираем элемент – 3. Так как

113

заканчиваем расчёт. Новая конфигурация состоит из БА № 1,2,5 и 7,

. Значение целевой функции для такой конфигурации

. Данная конфигурация также

удовлетворяет ограничению на энергопотребление.

Алгоритм случайного направленного поиска.

При реализации данного алгоритма примем, что число испытаний

$M=10$ .

Испытание 1, итерация №1: вычислим значимость для всех потенциально

работоспособных БА, используя полином (4.9) с

:

БА № 1 2 3 4 5 7

$\xi$  0,09375 0,09375 0,09375 0,09375 0,34375 0,34375

Разобьём отрезок  $[0;1]$  на шесть интервалов пропорционально значимости элементов: 0, 0.009, 0.018, 0.27, 0.36, 0.68, 1. Сгенерируем случайное число

$\zeta=0.712$ , это число попадает в последний интервал соответствующий

элементу 7. На данной итерации выбираем элемент –  $j = 7$ . Модифицируем

вероятностный полином с учётом текущей конфигурации

Испытание 1, итерация №2: вычислим значимость работоспособной БА, кроме №7, используя полином

:  
БА № 1 2 3 4 5

$\xi$  0,1875 0, 1875 0, 1875 0, 1875 0,6875

Аналогично предыдущей итерации – разбиваем интервал [0;1] на отрезки соответствующие значимости выбираемых элементов: 0, 0.13, 0.26, 0.39, 0.52, 1. При  $\zeta=0.283$  выбираем элемент –  $j = 3$ . Модифицируем вероятностный полином с учётом

114

Испытание 1, Итерация №3: вычислим значимость для работоспособной БА, кроме №7 и 3, используя полином

:  
БА № 1 2 4 5

$\xi$  0,125 0, 125 0, 125 0, 875

Разбиваем интервал [0;1] на отрезки: 0, 0.1, 0.2, 0.3, 1. При  $\zeta=0.556$  выбираем элемент –  $j = 5$ .

Испытание 1, Итерация №4: вычислим значимость для работоспособной БА, кроме № 7, 3 и 5, используя полином

:  
БА № 1 2 4

$\xi$  0, 25 0, 25 0, 25

Разбиваем интервал [0;1] на отрезки: 0, 0.33, 0.66, 1. При  $\zeta=0.734$  выбираем элемент –  $j = 4$ .

заканчиваем расчёт для испытания 1. Первая альтернативная рабочая конфигурация состоит из БА № 3,4,5 и 7. Тогда вектор рабочей конфигурации

Аналогично проводим ещё девять испытаний. Результат испытаний представлен в таблице 3.2.

115

Таблица 4.2 Результат испытаний алгоритма случайного направленного поиска

№ Работа

алгоритма

Вектор

Энергопотребление,

Вт

Значение

целевой

функции

1 7 3 5 4

97 0.844

2 4 7 5 1

102 0.73

3 7 2 5 3

91 0.678

4 7 5 3 2

91 0.678

5 5 7 3 1

95 0.73

6 7 4 5 2

98 0.678

7 2 5 3 7

91 0.678

8 1 7 4 5

102 0.73

9 7 2 5 1

96 0.522

10 4 7 5 3

97 0.844

Из полученных альтернатив выберем удовлетворяющие ограничению на энергопотребление (до 97 Вт), а также учтём одинаковые варианты. Тогда итоговое множество альтернатив будут состоять из следующих элементов:

, значение целевой функции - 0.844;

, значение целевой функции - 0.678;

, значение целевой функции - 0.73;

, значение целевой функции - 0.522.

Альтернатива, доставляющая максимальное значение целевой функции -

. После завершения работы алгоритма в контур

будут включены БА № 3,4,5,7.

116

4.5 Проведение экспериментов с помощью ПК «Реконфигурация».

Оценка эффективности функционирования КА

При проведении экспериментов рассматривались следующие сценарии реконфигурации в зависимости от технологии управления КА:

- 1) стандартная реконфигурация с полным задействованием НКУ по однопунктной схеме управления КА;
- 2) стандартная реконфигурация, проводимая автоматически на борту КА (с задействованием НКУ в аварийном режиме) с учётом однопунктной схемы управления КА;
- 3) структурно-функциональная реконфигурация (алгоритм случайного направленного поиска), проводимая автоматически на борту КА (с задействованием НКУ в аварийном режиме) с учётом однопунктной схемы управления КА;
- 4) структурно-функциональная реконфигурация («жадный» алгоритм), проводимая автоматически на борту КА (с задействованием НКУ в аварийном режиме) с учётом однопунктной схемы управления КА.

Исходные данные, приведённые в пунктах с 3) по 8) в 4.2.4, будут задаваться с графической формы ПК «Реконфигурация» в соответствующих полях для ввода. Исходные данные, обозначенные в пунктах 1) и 2) в 4.2.4, задаются в программном коде и не подлежат изменению в пользовательском режиме работы с ПК.

#### 4.5.1 Описание модельных условий функционирования КА

Проведение экспериментов осуществляется с учетом следующих условий функционирования КА.

Логические условия работоспособности для технической структуры

СУД:

- для основной схемы ориентации:

117

;

- для дополнительной схемы ориентации:

;

- для экстренной схемы ориентации:

;

- для исполнительных органов, стабилизация на ДМ:

- для исполнительных органов, стабилизация на ЖРД:

.

Условия проведения сеанса целевой аппаратуры (СЦА) будут задаваться величиной интервала времени, в пределах которого КА должен использовать ОСХО или ДСХО и стабилизироваться на управляющих двигателях-маховиках. Для передачи на наземные средства НКУ целевой информации используется дополнительно ЭСХО, а также стабилизация на ЖРД.

Нахождение КА в ЗРВ определяется условием:

, (4.12)

где

– признак нахождения КА в ЗРВ, , – текущие значения дальности от КА до ОКИК и угла места,

,

– предельные

118

характеристики технического средства ОКИК, который осуществляет связь с КА.

Реконфигурация СУД КА в ПК реализуется по алгоритмам, описанным в главе 3 (3.1.2 и 3.2), т.е. с задействованием НКУ (с привлечением «живого» интеллекта, человека-оператора) или при автономном функционировании КА (без управления от НКУ). Для алгоритмов стандартной реконфигурации

СУД: БА, вышедшая из строя, заменяется соответствующей работоспособной, следующей по порядку. Для алгоритмов структурнофункциональной реконфигурации СУД: при выходе из строя БА, заново

синтезируется новая структура СУД, при этом рабочая конфигурация БА СУД удовлетворяет ограничениям на энергопотребление и является более оптимальна с точки зрения равномерного распределения временного ресурса БА.

#### 4.5.2 Моделирование функционирования КА при стандартной реконфигурации СУД

Характерной чертой данной реконфигурации является то, что реконфигурация СУД осуществляется только по команде с НКУ, то есть только после того, как КА окажется в ЗРВ. При этом группа управления и анализа фактически отвечает за синтез новой структуры СУД. Такая последовательность действий приводит к некоторой временной задержке. Важно отметить, БА после сбоя может быть восстановлено через заданный промежуток времени (время восстановления), в связи с чем появляется необходимость во введении временной уставки на проведение реконфигурации. В случае перехода в режим неориентированного полёта и последующего восстановления ориентации по ОСХО (ДСХО, ЭСХО) значение временной уставки на восстановление штатной работы увеличивается. Таким

образом, для сценариев со стандартной реконфигурацией вводится временная уставка на переход между режимами ориентации КА.

119

Таблица 4.1 – Исходные данные для комплексного моделирования функционирования КА

Исходные данные по характеристикам Т р И Н и их местоположению

№ Тср Географические

координаты

Максимальная

дальность  $D_{max}$

,

км

Минимальный угол

места  $A_{min}$

, градус

широта  $\varphi$  долгота  $\lambda$

1 60

с.ш. 30

в.д. 2000 20

Начальные условия для орбитального движения

наклоне

ние  $i$ ,

градус

долгота

восходя

щего

узла  $\Omega$ ,

градус

аргумент

перигея

$\omega_p$

, градус

истинная

аномалия

$k$

, градус

высота

апогея

$h$

$a$

, км

высота

перигея

$h$

$p$

, км

дата

старта,

ДМВ

70 1 1 1 1000 980 01.01.15

19:00:00

Исходные данные по

Суммарное

энергопотребление,

Вт

Объём

пакета СЦА,

Мб

Скорость передачи

целевой информации на

наземные средства, Мб/с

Интервал

СЦА, с

34 200 3 1800

Исходные данные по характеру сбоев и временному ресурсу БА

считаем для всех средств однотипными: Т

сб

= 100 ч., t

сб

= 20 ч., Т

в

= 10 ч.,

Т

0

= 400 ч. Исходные данные по энергопотреблению представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Исходные данные по характеру сбоев и отказов БА  
тип БА ОЗД ПОЗ ВОГ бл. ЖРД ДМ МС ССКМ  
Энергопотребление, Вт 2,0 2,5 1,0 2,0 7,0 2,0  
120

Оценкой эффективности работы КА по целевому назначению будем считать общее время работы по целевому назначению, а также количество успешно завершённых сеансов целевой аппаратуры.

Для детального анализа в качестве результатов моделирования, полученных с помощью ПК «Реконфигурация» используются:

- график проведения сеансов целевой аппаратуры;
- график переключения режимов ориентации КА («точная» ориентация (ОСХО), «точная» ориентация (ДСХО), «грубая» ориентация, неориентированный полёт);
- график возникновения сбоев и отказов БА (чувствительных элементов и исполнительных органов).

В виде отдельных значений (и таблиц значений) выводится на форму ПК:

- число проведённых сеансов;
- время работы по целевому назначению КА, ч.;
- суммарная наработка на отказ и оставшееся время до моделируемого отказа БА, ч.

Режимы ориентации КА обозначены на графике переключения режимов следующими значениями:

- «точная» ориентация, штатное функционирование КА (Основная схема ориентации) – «1»;
- «точная» ориентация, штатное функционирование КА (Дополнительная схема ориентации) – «6»;
- «грубая» ориентация, безопасный режим функционирования КА – «3»;
- КА в неориентированном полёте (СУД неработоспособен) – «-1».

Сценарий 1. Условия сценария: восстановление работоспособности КА производится при выполнении стандартной реконфигурации, реализуемой при помощи НКУ, схема управления однопунктная, исходные данные – таблица 4.1,4.2.

121

- а) переключение режимов работы СУД
- б) сеансы целевой аппаратуры

Рисунок 4.6 Графики моделирования для сценария 1

В результате проведённых экспериментов видно, что после невозможности перевода КА в режим «точной» ориентации, КА функционирует в режиме «грубой» ориентации, что позволяет передать необходимую информацию с бортового ЗУ на наземные средства (частичная работоспособность КА). При реализации стандартной реконфигурации вариант «точной» ориентации с дополнительной схемой не задействуется.

В случае проведения стандартной реконфигурации СУД в автоматическом режиме рабочая конфигурация БА и схемы ориентации определяются на борту КА. Если КА переведён в режим НП (обозначен «-1» на графике режимов), восстановление работоспособности КА происходит только с использованием средств НКУ. Такая логика обусловлена тем, что при возникновении предаварийных ситуаций (перевод КА в режим НП) требуется более детальный анализ ТМИ о состоянии БА и КА для предотвращения дальнейшего развития нештатной ситуации.

122

Сценарий 2. Условия сценария: восстановление работоспособности КА производится при помощи стандартной реконфигурации, реализуемой автоматически при идентификации сбоя (или отказа) на борту КА, схема управления однопунктная, исходные данные – таблица 4.1, 4.2.

- а) переключение режимов работы СУД
- б) сеансы целевой аппаратуры

Рисунок 4.7 Графики моделирования для сценария 2

4.5.3 Моделирование функционирования КА при структурнофункциональной реконфигурации СУД

Сценарий 3. Условия сценария: восстановление работоспособности КА производится с применением алгоритмов структурно-функциональной реконфигурации, реализуемой автоматически при идентификации неисправной БА на борту КА. Применяемый алгоритм структурной реконфигурации – алгоритм случайного направленного поиска, исходные данные – таблица 4.1, 4.2.

123

- а) переключение режимов работы СУД
- б) сеансы целевой аппаратуры

Рисунок 4.8 Графики моделирования для сценария 3

Сценарий 4. Условия сценария: восстановление работоспособности КА производится с применением алгоритмов структурно-функциональной реконфигурации, реализуемой автоматически при идентификации сбоя (или

отказа) на борту КА. Применяемый алгоритм реконфигурации – «жадный» алгоритм, исходные данные – таблица 4.1,4.2.

124

а) переключение режимов работы СУД

б) сеансы целевой аппаратуры

Рисунок 4.9 Графики моделирования для сценария 4

Таблица 4.3 - Результаты экспериментов

№ сценария

Число

успешно

проведё

нных

СЦА

Число СЦА

без учёта

сбоев и

отказов БА

Объём информации

переданный на

наземные средства

без учёта сбоев и

отказов БА

Время работы

по целевому

назначению,

ч.

Общее время

работы

«экстренной»

схемы

ориентации, ч.

1 736 960 805 372,7 389,2

2 1013 1200 1013 514,7 601,7

3 1020 1248 1052 518 592

4 1067 1345 1130 540 641,5

125

Таблица 4.4 - Значения комплексных показателей надёжности

№ сценария

1 0,55 0,65 0,55 0,58

2 0,75 0,90 0,76 0,89

3 0,76 0,90 0,77 0,88

4 0,79 0,94 0,80 0,95

Для анализа результатов, полученных при моделировании стандартной и структурно-функциональной реконфигурации СУД, сравним некоторые временные характеристики работы БА: израсходованный временной ресурс БА и его остаток (соответственно левая и правая колонка в таблице 4.5 для каждого эксперимента), а также значимость элементов в структурном построении СУД для двух режимов функционирования КА (рисунок 4.10).

Рисунок 4.10 Диаграмма значимости структурных элементов СУД для режимов функционирования КА

Из рисунков 4.6 – 4.10, а также таблиц 4.3 и 4.4 можно сделать выводы:

0

0,02

0,04

0,06

0,08

0,1

0,12

0,14

0,16

0,18

0,2

ОЗД1

ОЗД2

ОЗД3

ОЗД4

ПОЗ1

ПОЗ2

ВОГ11

ВОГ21

ВОГ11

ВОГ31

ВОГ41



ВОГ22  
ВОГ32  
ВОГ42

[12]

бл1  
бл2  
бл3  
ДМ1  
ДМ2  
ДМ3  
ДМ4  
МС1  
МС2  
МС3  
Режим №1  
Режим №2  
126

автоматизация на борту КА стандартной реконфигурации (таблица 4.4) увеличивает общее число проведённых СЦА (на 37% по сравнению с реконфигурацией, проводимой в «ручном» режиме с НКУ); введение структурно-функциональной реконфигурации незначительно повлияло на эффективность функционирования КА, а соответственно на комплексные показатели надёжности; дополнительная схема ориентации используется только при проведении структурно-функциональной реконфигурации, что способствует более равномерному распределению временного ресурса БА, однако – не приводит к увеличению общего времени функционирования по целевому назначению по сравнению со стандартной реконфигурацией, проводимой в автоматическом режиме.

Из таблицы 4.5 видно, что самыми значимыми элементами и с точки зрения структурной надёжности (последний столбец таблицы), и с точки зрения расхода временного ресурса являются исполнительные органы СУД, за счёт которых обеспечивается стабилизация КА. При этом самыми важными элементами для режима «точной» ориентации и для режима «грубой» ориентации являются жидкостные ракетные двигатели и управляющие двигатели маховики. Также можно отметить чуть меньшую значимость ВОГ по сравнению с исполнительными органами для режима «грубой» ориентации. Для целевого применения КА (режим «точной» ориентации) ВОГ имеют большую значимость, чем ЖРД и МС ССКМ.

127

Таблица 4.5 – Временные характеристики БА в результате моделирования сценариев 1,2,3,4 №

БА

Вид БА № Сценария структурная значимость

1 2 3 4 Режим №1 Режим №2

1	ОЗД	400	0	400	0	202,1	197,9	204,9	195,1	0,0232	0,0074
2	ОЗД	400	0	400	0	202,1	197,9	204,3	195,7	0,0232	0,0074
3	ОЗД	386,5	13,5	400	0	202,1	197,9	205	195	0,0232	0,0074
4	ОЗД	45,3	354,7	115	285	202,9	197,1	204,8	195,2	0,0232	0,0074
5	ПОЗ	0	400	5	395	202	198	204	196	0,0155	0,0074
6	ПОЗ	0	400	0	400	201,9	198,1	204,2	195,8	0,0155	0,0074
7											
8	ВОГ (ИУС)	400	0	400	0	255,9	144,1	240,1	160	0,0529	0,0074
9	ВОГ (ИУС)	400	0	400	0	256,3	143,7	240	160	0,0529	0,0074
10	ВОГ (ИУС)	400	0	400	0	255,8	144,2	240,1	159,9	0,0529	0,0074
11	ВОГ (ИУС)	400	0	400	0	341	59	249,8	150,2	0,0529	0,1552
12	ВОГ (ИУС)	327,4	72,6	385	15	256,9	143,1	240	160	0,0529	0,0074
13	ВОГ (ИУС)	34,3	365,7	56	344	256,2	143,8	240	160	0,0529	0,0074
14	ВОГ (ИУС)	15,5	384,5	27	373	256,1	143,9	240	160	0,0529	0,0074

) 72,3 327,7 112 288 341 59 248,3 151,7 0,0529 0,1552

128

Таблица 4.5 (Продолжение) – Временные характеристики БА в результате машинного моделирования сценариев 1,2,3,4 №

БА

Вид БА № Сценария структурная значимость

1 2 3 4 Режим №1 Режим №2

15	бл	ЖРД	399	1	400	0	400	0	329,1	70,9	0,0361	0,1817
16	бл	ЖРД	400	0	400	0	398,1	1,9	376	24	0,0361	0,1817
17	бл	ЖРД	400	0	400	0	369	31	400	0	0,0361	0,1817
18	ДМ	399	1	400	0	369	31	400	0	0,1298	0,1703	
19	ДМ	400	0	400	0	362	38	0,1298	0,1703			

20 ДМ 400 0 355 45 400 0 400 0 0,1298 0,1703  
 21 ДМ 58,1 341,9 225 175 331,1 68,9 386 14 0,1298 0,1703  
 22 МС ССКМ 399 1 400 0 218 182 167 233 0,0361 0,0568  
 23 МС ССКМ 400 0 400 0 209 191 189,1 210,9 0,0361 0,0568  
 24 МС ССКМ 39 361 120 280 225,1 174,9 156,1 243,9 0,0361 0,0568  
 129

4.5.5 Дополнительные эксперименты и анализ полученных результатов  
 При проведении стандартной и структурно-функциональной реконфигурации СУД временной ресурс БА для рассматриваемого примера расходуется таким образом, что ИО (ЖРД и ДМ) оказываются самым уязвимыми элементами. При этом распределение времени работы остальных приборов различно в зависимости от выбранного типа реконфигурации (стандартная или структурно-функциональная). Так для стандартной реконфигурации по окончании моделирования становится неработоспособным прибор ИУС №1, что не характерно для структурнофункциональной реконфигурации. Для дальнейшего анализа был проведён ещё ряд дополнительных экспериментов с увеличением временного ресурса ЖРД и ДМ в полтора раза. Обозначим эти эксперименты как сценарии 1.1, 2.1, 3.1, 4.1. Результаты проведенных экспериментов с изменёнными ИД представлены в таблицах 4.6, 4.7, 4.8.

Таблица 4.6 - Результаты дополнительных экспериментов

№ сценария

Число  
успешно  
проведё  
нных  
СЦА  
Число СЦА  
без учёта  
сбоев и  
отказов БА  
Объём информации  
переданный на  
наземные средства  
без учёта сбоев и  
отказов БА  
Время работы  
по целевому  
назначению,  
ч.  
Общее время  
работы  
«экстренной»  
схемы  
ориентации, ч.

1.1 1081 1454 1243 547 602  
 2.1 1262 1497 1277 640 739  
 3.1 1669 1827 1610 845,9 912,9  
 4.1 1719 1950 1732 868,9 973,9  
 130

Таблица 4.7 - Значения комплексных показателей надёжности  
 (дополнительные эксперименты)

№ сценария

1.1 0,56 0,63 0,54 0,6  
 2.1 0,65 0,73 0,63 0,73  
 3.1 0,86 0,92 0,83 0,90  
 4.1 0,88 0,96 0,85 0,96  
 131

Таблица 4.8 - Временные характеристики БА в результате машинного моделирования сценариев 1.1,2.1,3.1,4.1  
 №

БА

Вид БА № Сценария структурная значимость

1.1 2.1 3.1 4.1 Режим №1 Режим №2  
 1 ОЗД 400 0 400 0 286 114 292,4 107,6 0,0232 0,0074  
 2 ОЗД 400 0 400 0 286 114 292,9 107,1 0,0232 0,0074  
 3 ОЗД 400 0 400 0 285,8 114,2 292,9 107,1 0,0232 0,0074  
 4 ОЗД 400 0 400 0 286,1 113,9 301 99 0,0232 0,0074  
 5 ПОЗ 40,2 359,8 100 300 285,2 114,8 293 107 0,0155 0,0074  
 6 ПОЗ 0 400 0 400 297 103 292,8 107,2 0,0155 0,0074  
 7

ВОГ (ИУС) 400 0 400 0 355,5 44,5 318,9 81,1 0,0529 0,0074  
 8 ВОГ (ИУС) 400 0 400 0 369 31 319,9 80,1 0,0529 0,0074  
 9 ВОГ (ИУС) 400 0 400 0 356,1 43,9 350 50 0,0529 0,0074  
 10 ВОГ (ИУС) 400 0 400 0 400 0 400 0 0,0529 0,1552

- 11 ВОГ (ИУС) 400 0 400 0 355 45 319,4 80,6 0,0529 0,0074  
 12 ВОГ (ИУС) 360 40 340 60 355,4 44,6 320 80 0,0529 0,0074  
 13 ВОГ (ИУС) 184,5 215,5 200 200 355 45 319,9 80,1 0,0529 0,0074  
 14 ВОГ (ИУС)<sup>[12]</sup>

) 108,2 291,8 200 200 400 0 400 0 0,0529 0,1552

132

Таблица 4.8 (Продолжение) – Временные характеристики БА в результате машинного моделирования сценариев

1.1,2.1,3.1,4.1

№

БА

Вид БА № Сценария структурная значимость

1 3 5 6 Режим №1 Режим №2

1 бл ЖРД 598,4 1,6 600 0 531 69 481 119 0,0361 0,1817

2 бл ЖРД 600 0 600 0 505 95 523 77 0,0361 0,1817

3 бл ЖРД 400 200 420 180 532 68 517 83 0,0361 0,1817

4 ДМ 600 0 600 0 546 54 600 0 0,1298 0,1703

5 ДМ 594,9 5,1 600 0 600 0 564 36 0,1298 0,1703

6 ДМ 600 0 560 40 600 0 600 0 0,1298 0,1703

7 ДМ 70,6 529,4 220 380 561 39 582 18 0,1298 0,1703

8 МС ССКМ 400 0 400 0 241 159 205 195 0,0361 0,0568

9 МС ССКМ 400 0 400 0 288 112 218 182 0,0361 0,0568

10 МС ССКМ 39,7 435,6 40 379 277 190 223 199 0,0361 0,0568

133

Проведённые дополнительные эксперименты показали значительное увеличение эффективности функционирования КА при увеличении ресурса отдельных структурных элементов ЖРД и ДМ (см. таблицы 4.3, 4.6):

для сценария со стандартной реконфигурации (осуществляемой посредством команд с НКУ) по сравнению с аналогичным сценарием эффективность целевого применения увеличилась на 47% (с 736 СЦА до 1081 СЦА);

для сценария со стандартной реконфигурации производимой автоматически на борту КА по сравнению с аналогичным сценарием эффективность целевого применения увеличилась на 25% (с 1013 СЦА до 1262 СЦА);

для сценария со структурно-функциональной реконфигурацией по сравнению с аналогичным сценарием (для «жадного» алгоритма и алгоритма случайного направленного поиска) эффективность целевого применения увеличилась ~ 60% (с 1020 СЦА до 1669 СЦА и с 1067 СЦА до 1719 СЦА соответственно)

Анализ полученных результатов в части комплексных показателей надёжности (см. таблицы 4.4, 4.7) показал большую эффективность применения алгоритмов структурно-функциональной реконфигурации, чем БА с одинаковым временным ресурсом. При увеличении временного ресурса наиболее значимой БА на 50%, алгоритмы структурно-функциональной реконфигурации более эффективно влияют на увеличение показателей эффективности функционирования КА. Так в сценариях №3.1 и 4.1 (таблица 4.7) показатель технического использования увеличивается на ~ 50% по сравнению со сценарием №1.1 и на 30% по сравнению со сценарием №1.2. В таблице 4.4 значение показателя технического использования увеличивается ~ 40% по сравнению со сценарием №1, при этом значительной разницы между сценариями №2,3,4 нет.

Таким образом, при неравномерном использовании бортовой аппаратуры СУД без переключения режимов ориентации некоторая

134  
 аппаратура остаётся практически незадействованной. Это может привести к ситуации, когда БА оставшаяся незадействованной не может обеспечить требуемую ориентацию для продолжения функционирования КА, как по целевому назначению, так и для передачи информации на НКУ. Такую ситуацию приводит к более быстрой деградации структуры СУД, что отражается на эффективности функционирования КА.

## Выводы

В заключение данного раздела можно сделать следующие выводы:

### 1. [1]

Предложен комплекс моделей, описывающих функционирование КА с учётом структурной динамики СУД. На основе данного комплекса и с учётом структурно-логической схемы проводимых экспериментов, разработан прототип программного комплекса (ПК) «Реконфигурация» для моделирования функционирования КА с учётом сбоев и отказов БА в контуре управления угловым движением. С помощью ПК «Реконфигурация» промоделированы и исследованы различные сценарии реконфигурации СУД КА.

2. Для оценивания эффективности функционирования КА были выбраны показатели целевого применения, характерные для КА радиолокационного наблюдения земной поверхности. При выполнении вычислительных экспериментов были приняты некоторые упрощения, связанные с отсутствием перерывов в работе целевой аппаратуры. В качестве основных показателей эффективности целевого применения были выбраны: число успешно проведённых сеансов целевой аппаратуры, общее время работы КА по целевому назначению, общее время работы КА в режиме с пониженной эффективностью. С учётом выбранных показателей были вычислены комплексные показатели надёжности: показатель технического использования и сохранения эффективности. Показатель технического использования характеризует математическое ожидание отношения времени работы по целевому назначению (с учётом времени на передачу информации

135 на НКУ) к общему времени функционирования КА. Показатель сохранения эффективности характеризует математическое ожидание отношения числа проведённых сеансов целевой аппаратуры (и переданных на НКУ) к номинальному значению сеансов целевой аппаратуры, проведённых за этот же период времени при безотказной и бессбойной работе БА.

3. Серия экспериментов, проведённых с помощью прототипа ПК «Реконфигурация», в целом подтвердила преимущества структурнофункциональной реконфигурации СУД КА по сравнению со стандартной

реконфигурацией. Были получены количественные оценки основных показателей функционирования КА с заданным составом бортовой аппаратуры СУД, схемами ориентации и режимами стабилизации. При проведении дополнительных экспериментов были изменены исходные данные в части увеличения временного ресурса наиболее значимой БА. В результате проведенных вычислительных экспериментов установлено, что увеличение временного ресурса наиболее значимой БА приводит к пропорциональному увеличению эффективности функционирования КА. Анализ результатов применения алгоритмов выбора рабочей конфигурации БА (на основе эвристического и бионического подходов) для сценария автоматической реконфигурации СУД показал их большую эффективность для СУД, состоящей из БА с различным временным ресурсом.

4. Отметим, что анализ результатов вычислительных экспериментов показал перспективность использования предложенных алгоритмов структурно-функциональной реконфигурации СУД не только для парирования нештатных ситуаций, но и для более рационального распределения бортового ресурса КА. Таким образом, реализация разработанной в диссертационной работе методики структурнофункциональной реконфигурации СУД КА позволяет осуществлять рациональное распределение бортового ресурса и увеличивать срок автономного функционирования современных КА.

136

Заключение

В ходе проведённого диссертационного исследования, формулировки и решения поставленной в работе научной задачи разработки модельноалгоритмического обеспечения реконфигурации СУД КА при различных технологиях управления,

были получены следующие научные и практические результаты.

1. Обоснована актуальность и **[1]**

проведён системный анализ задачи управления структурной динамикой КА. Разработана концептуальная и формальная модель процесса реконфигурации СУД КА на основе теории проактивного управления структурной динамикой с учётом смены режимов ориентации КА и выбора рабочей конфигурации БА.

2. В диссертационной работе проведены исследования реконфигурации СУД, элементами которой являются чувствительные элементы и исполнительные органы, а связи определяются их взаимодействием в рамках реализации конкретной схемы ориентации или режима стабилизации КА.

3. Задача выбора рабочей конфигурации БА при проведении реконфигурации СУД формализована в виде задачи математического программирования равномерного распределения временного ресурса БА с учетом ограничений на энергопотребление и работоспособность СУД.

4. Разработана методика проведения структурно-функциональной реконфигурации СУД для автоматизации её на борту КА, а также рассмотрены алгоритмы стандартной реконфигурации с задействованием НКУ для восстановления штатной работы БА СУД и с применением её в автоматическом режиме на борту КА.

5. Разработаны алгоритмы нахождения суб(квази)оптимального решения задачи выбора рабочей конфигурации БА на основе «жадного» алгоритма (эвристический подход) и алгоритма случайного направленного поиска (бионический подход). Данные алгоритмы являются ядром методики

проведения структурно-функциональной реконфигурации СУД КА.

137

6. В разделе 4 представлен комплекс моделей, описывающих функционирование КА. На основе представленной совокупности моделей разработан прототип программного комплекса для моделирования функционирования КА с учётом сбоев и отказов БА СУД. Произведены машинные эксперименты моделирования функционирования КА по различным сценариям проведения реконфигурации СУД, которые показали преимущества применения структурно-функциональной реконфигурации на борту КА.

Также в заключение важно отметить, что в диссертационной работе в процессе системного анализа проблемы управления структурной динамики КА проведение реконфигурации рассматривалось, прежде всего, как реакция на сбои и отказы, которые неизбежно возникают при эксплуатации любой аппаратуры (особенно цифровых приборов в условиях воздействия космического пространства). Другими словами, реконфигурация, с общепринятыми в науке и технике позициями, – это способ обеспечения сбое- и отказоустойчивости технической системы. Однако, в рамках проведенного диссертационного исследования установлено, что структурнофункциональная реконфигурация СУД КА также может служить для эффективного управления бортовыми ресурсами.

Таким образом,

дальнейшее развитие научных исследований в данной области целесообразно проводить в следующих направлениях:

[1]

моделирование процессов функционирования КА с учётом сбоев и отказов БА:

разработка моделей функционирования КА с учётом расхода/пополнения бортового ресурса и процессов структурной динамики, возникающей на борту КА;

проведение имитационного моделирования переходных процессов при переводе КА из текущего структурного состояния в заданное, с целью получения характеристик переходных

138

процессов при структурной динамике контура управления угловым движением КА;

разработка теоретических основ управления структурной динамикой КА:

разработка методологических и методических основ

исследования структурной динамики на борту КА;

решение задачи перепланирования режимов ориентации КА при проведении реконфигурации СУД с учётом перераспределения ресурсозатрат;

решение задачи синтеза новых структурных состояний КА при проведении структурно-функциональной реконфигурации СУД.

139

Список сокращений и условных обозначений

АКБ – аккумуляторная батарея

АПО – активный подвижный объект

АвР – аварийный режим

АС – аномальная ситуация

АСУ – автоматизированная система управления

БА – бортовая аппаратура

БВС – бортовая вычислительная система

БКУ – бортовой комплекс управления

БОК – бортовой обеспечивающий комплекс

БПО – бортовое программное обеспечение

БСК – бортовой специальный комплекс

БСКВУ – бортовая синхронизирующее координатно-временное устройство

БЦВМ – бортовая цифровая вычислительная машина

ВОГ – волоконно-оптический гироскоп

ВП – вероятностный полином

ГЛОНАСС – глобальная навигационная спутниковая система (РФ)

ГСК – Гринвичевская система координат

ДМ – двигатель-маховик

ДНФ – дизъюнктивная нормальная форма

ДСхО – дополнительная схема ориентации

ЖРД – жидкостный ракетный двигатель

ЗРВ – зона радиовидимости

ИД – исходные данные

ИО – исполнительные органы

ИСАУ – интегрированная САУ

140

ИСК – инерциальная система координат

ИУС – измеритель угловой скорости

КА – космический аппарат  
 КИС – командно-измерительной системы  
 КБУ – контур бортового управления  
 КС – космическая система  
 МС – магнитный стержень  
 НКУ – наземный комплекс управления  
 ОДУ – объединённая двигательная установка  
 ОЗД – оптический звездный датчик

ОКИК – отдельный командно-измерительный комплекс  
 ОЛВМ – общий логико-вероятностный метод

[1]

ОСхО – основная схема ориентации  
 ПК – программный комплекс  
 ПОЗ – прибор ориентации по Земле  
 ПСБ – панели солнечных батарей  
 РП – рабочая программа  
 САС – срок активного существования  
 САУ – система автоматического управления  
 САУТ – системы активной управляемой технологии  
 СИО – система информационного обмена  
 СК – система координат  
 СКВР – система контроля и восстановления работоспособности  
 СКПУ – система координатно-параметрического управления  
 СхО – схема ориентации

141

СС – сеанс связи  
 ССКМ – система сброса кинетического момента  
 ССН – система спутниковой навигации  
 СТКРП – система трансляции команд и распределения питания  
 СТО – сложный технический объект  
 СФР – структурно-функциональная реконфигурация  
 СУ – система

управления

СУБА – система управления бортовой аппаратурой  
 СУД – система управления движением  
 СУЖ – система управления живучестью

[1]

СУСмС – система управления смежных систем  
 СЭП – система электропитания  
 СЦА – сеанс целевой аппаратуры  
 ТМИ – телеметрическая информация  
 ТЦУ – технологический цикл управления  
 ФАЛ – функция алгебры логики  
 ЧЭ – чувствительные элементы  
 ЦА – целевая аппаратура  
 ЭВМ – электронная вычислительная машина  
 ЭСхО – экстренная схема ориентации  
 GPS – global position system  
 MEMS – microelectromechanical systems

142

Литература

1. Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Дятлов С.А., Куркина А.Н., Сазонов В.В. Алгоритм совместной обработки данных измерений звёздных координаторов и микроэлектромеханических датчиков угловой скорости // Механика, управление и информатика (ИКИ РАН), №2, 2011, – с. 36-48
2. Аликин Ю.И., Гассиева М.П., Гуткин А.Р., Кравец В.Г., Салихов Р.С. Некоторые особенности создания космического аппарата «КОРОНАСФОТОН» // Механика, управление и информатика, 2010, №3, – с. 8-26
- 3.

Ахметов Р.Н., Макаров В.П., Соллогуб А.В. Концепция [9] автономного управления живучестью автоматических [6] космических аппаратов дистанционного зондирования Земли в аномальных ситуациях // Известия самарского научного центра РАН [1]

, 2009, №3-1, т.11 – с. 165176

4. Ахметов Р.Н.

Методы и модели автономного управления живучестью автоматических космических аппаратов дистанционного зондирования

Земли // [6] Вестник самарского государственного аэрокосмического университета [63]

им. академика С.П. Королёва, Самара, СГАУ, 2008, №2(15) – с. 194-210  
5.

Ахметов Р.Н., Макаров В.П., Соллогуб А.В. Принципы управления космическими аппаратами мониторинга Земли в аномальных ситуациях // [1]

Информационно-управляющие системы, СПб, ГУАП, 2012, №1 – с. 16-22  
6.

Ахметов Р.Н., Макаров В.П., Соллогуб А.В. Проблемы реинжиниринга автоматических космических аппаратов в [9]

аномальных полётных ситуациях и пути их решения на основе базы знаний // Вестник самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва, Самара, СГАУ, 2014, №1 (43) – с. 9-21  
143

7. Ахметов Р.Н., Макаров В.П., Соллогуб А.В. Особенности управления живучестью КА мониторинга Земли // Вестник самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва, Самара, СГАУ, 2012, №4(35) – с. 18-28

8. Базовский И. Надежность. Теория и практика / М.: Мир, 1965. 373 с.  
9. Барановский А.М., Привалов А.Е.

Система контроля и диагностирования бортового оборудования малого космического аппарата // [53]

Изв. ВУЗов. Приборостроение, 2009, №4, т. 52 – с. 51-56  
10.

Беленков В.Г. Катастрофоустойчивость корпоративных информационных систем. Часть 1 / В. Г. Беленков, В. И. Будзко, И. Н. Сеницын. – М.: ИПИ РАН, 2002.

11. [1]

Белецкий Вл. В. Движение искусственного спутника относительно центра масс / М.: «

Наука», 1965. – 416 с.

12. Белов П.Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере: учебное пособие для студ. высш. учеб. Заведений / П. Г. Белов. – М.: Издательский центр «Академия », 2003. – 512 с.

13. Будзко В.И. К выбору варианта построения катастрофоустойчивых информационно-телекоммуникационных систем / В. И. Будзко, В. Г. Беленков, П. А. Кейер // Системы и средства информатики. – М.:

Наука, 2003. – вып [1]

. 13. – с. 16-40

14. Беленький А.Д., Васильев В.Н., Семёнов А.С., Семёнов М.Е. Алгоритм управления системой четырёх двигателей-маховиков космических аппаратов серии «Метеор-М» №2 // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ, 2008, №3, т. 134 – с. 9-14

15. Беленький А.Д., Васильев В.Н., Семёнов М.Е. Исследование динамики ориентации и стабилизации по курсу космического аппарата «МетеорМ» при использовании информации инфракрасной вертикали и

датчиков угловой скорости // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ, 2008, т. 107 – с. 38-45

144

16. Богов А.Н., Сотников М.В., Вознюк А.М. Контрольно-резервная схема определения ориентации КА дистанционного зондирования Земли // Инновационный арсенал молодёжи: труды третьей науч.техн. конф. / ФГУП «КБ «Арсенал»; Балт. Гос. Техн. Ун-т. – СПб.: 2012. – 146-149 с.

17.

Бортовые системы управления космическими аппаратами: Учебное пособие / Бровкин А.Г., Бурдыгов Б.Г., Гордийко С.В., и др. [37]

Под

редакцией А.С. Сырова – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. – с. 304

18.

Бранец В.Н. Применение кватернионов в задачах ориентации твёрдого тела / Бранец В.Н., Шмыглевский И.П., 1973 – М.: Наука, с. 320

19. [59]

Бычков Ю.П., Ковш Ю.В., Петрякова И.А., Сигал Л.Н.  
Электромагнитные системы сброса кинетического момента // Механика, управление и информатика ИКИ РАН, 2013, №1 (13) – с. 97103  
20.

Васильев С.Н. От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению // Теория и системы управления, 2001. - № 1; № 2.

21. Васильев В. А., [5]

Левкин М. И., Павленко А. И. Реконфигурация интегрированной системы управления с помощью экспертной системы // Вопросы кибернетики. Вып. 139. Управляющие вычислительные системы движущихся объектов / Под ред. И. С. Уколов. – М., 1988, с. 90-97  
22.

Горопашная А.В. Методы анализа безопасности сложных технических систем : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : 05.13.01 / Горопашная Анастасия Визвтовна. – СПб [1]

., 2009. – 17 с.

23. Губанов И.П., Артюхов М.И, Молодцова В.А. Организация функционирования бортовых систем КА «Спектр-УФ» // Вестник НПО им. Лавочкина, №5(26), 2014. – с. 24-33  
24.

Добановский С.А., Озерянный Н.А. [5] Системы автоматического управления с реконфигурацией // Измерение, контроль, автоматизация, 1990, № 4(76) – с.62-80  
145

25. Додонов А.Г. Введение в теорию живучести вычислительных систем / А. Г. Додонов, М. Г. Кузнецова, Е. С. Горбачик , отв. ред. В. А. Гуляев. – Киев: Наукова думка , 1990. – 184 с.

26. Додонов А.Г. Живучесть информационных систем / А. Г. Додонов, Д. В. Ландэ. – К.: Наукова думка [1] , 2011. – 256 с.

27. Захаров В.Н. Интеллектуальные системы управления: основные понятия и определения // Известия РАН. Теория и системы управления [5]

, 1997, № 3, с. 138 – 145.

28. Игнатъев М.Г., Копылов В.М., Кулаков А.Ю., Сотников М.В. Программный комплекс моделирования стабилизированного движения космического аппарата с трансформируемыми упругими элементами конструкции // Вестник СибГАУ. – Красноярск: СибГАУ, 2013, №3, с. 45-48

29. Изнар А. Н. Оптико-электронные приборы космических аппаратов / А.В. Павлов, Б.Ф. Фёдоров. – М.: Машиностроение, 1972. – 368 с.

30. Калинин В.Н. Теоретические основы управления

активными

подвижными объектами. - [15] МО СССР, 1974.-223с.

31. [43] Калинин В.Н., Резников Б.А., Теория систем и управления (структурно-математический подход). – Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского [15] , 1978. – 417 с.

32. Калинин В.Н., Резников Б.А., Варакин Е.Н. Теория систем и оптимального управления. Ч. 1. [14] Основные понятия, [15]

математические

модели и методы анализа систем. – Л.:

ВИКИ им. А.Ф. Можайского,  
1979. –319 с.

33. [15] Калинин В.Н., Резников Б.А., Варакин Е.Н. Теория систем и оптимального управления. Ч. 2. Понятия, модели, методы и алгоритмы оптимального выбора. – [14] МО СССР, 1987. – 589 с.

34. Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Куренков В.И., Капитонов В.А., Стратилатов Н.Р., Лохматкин В.В. Влияние надёжности бортовых систем космических аппаратов ДЗЗ на показатели периодичности  
146



съёмки // Вестник самарского государственного аэрокосмического университета [27]

им. академика С.П. Королёва, Самара, СГАУ, 2013, №4(42) – с. 170-180  
35.

Кирилин А. Н. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии / А. Н. Кирилин, Р. П. Ахметов, В. П. Макаров, А. В. Соллогуб. – М.: Машиностроение [1]

, 2010. – 384 с.

36. Князева Н. А. Повышение структурной живучести телекоммуникационной сети // International Journal "Information Models and Analyses", 2013, Number 3, Vol.2 , - 275-284 с.

37. Коваленко А.П. Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами / М.: Машиностроение, 1975. – 248 с.

38. Копылов В.М., Кулаков А.Ю. Автоматическая диагностика и реконфигурация бортовых систем космического аппарата на основе телеметрических данных // Инновационный арсенал молодёжи: труды пятой науч.-техн. конф. / ФГУП «КБ «Арсенал»; БГТУ. – СПб, 2014. – 389 с., с. 143-145

39. Кукушкин С.С., Потюпкин А.Ю., Николаев Б.П. Прикладные направления целевого применения кластеров малогабаритных космических аппаратов // «Двойные технологии», 2008, №2(43), – с. 6474

40. Кулаков А.Ю. Влияние сбоев и отказов системы управления движения на топливный ресурс космического аппарата и его срок активного существования // Инновационный арсенал молодёжи: труды пятой науч.-техн. конф. / ФГУП «КБ «Арсенал»; БГТУ. – СПб, 2014. – 389 с., с. 139-142

41. Кулаков А.Ю. Задача выбора оптимальной конфигурации бортовых средств космического аппарата // Актуальные проблемы ракетнокосмической техники : материалы четвёртой всероссийской науч.-техн.

конф. 14-18 сентября 2015 г. – Самара: СамНЦ РАН, 2015. – с. 126-128  
147

42. Кулаков А.Ю. Модель оценивания расхода топлива космического аппарата с учётом нештатных ситуаций // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2014, т. 57, №11 – с. 30-34

43. Кулаков А.Ю. Повышение эффективности функционирования КА ДЗЗ за счёт структурного и функционального резерва // Инновационный арсенал молодёжи: труды четвёртой науч.-техн. конф. / ФГУП «КБ «Арсенал»; БГТУ. – СПб, 2013. – 389 с., с. 139-142

44.

Кулаков А.Ю., Павлов А.Н., Павлов Д.А. Функциональная реконфигурация чувствительных элементов СУД [12]

КА / Труды

СПИИРАН, 2013, выпуск 5(28), – с. 169-181  
45.

Куренков В. И. Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения. [24] учебное [34] пособие / В.И. Куренков, В.В. Салмин, Б.А. Абрамов; [24]

Федер. агентство

по образованию, Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования "Самарский гос. аэрокосмич. ун-т им. акад. С.П. Королева". - Самара : Изд-во СГАУ, 2006. - 295 с.

46. Лохматкин В. В., Куренков В. И. Прогнозирование производительности съёмки КА ДЗЗ с учетом надежности бортовых систем // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2013. Т. 15, № 4 (2)

47. Макаров В.П., Сомов Диагностика состояния и реконфигурация отказоустойчивых гиросиловых систем космических аппаратов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: технические науки, 2008, № 1(21), - с. 23-28

48. Максименко С.Л., Мелехин В.Ф., Анализ надёжности функционирования узлов цифровых СБИС со структурным резервированием и периодическим восстановлением работоспособного состояния // Информационно-управляющие системы, №2, 2013 г. – с. 18-23

148

49.

Методы анализа и синтеза структур управляющих систем / Б.Г. Волик, Б.Б. Буянов, Н.В. Лубков и др.; Под. ред. Б.Г. [1] Волика. – М.:

Энергоатомиздат<sup>[5]</sup>, 1988. – 296 с.

50. Можаяев А. С. Аннотация программного средства "АРБИТР" (ПК АСМ СЗМА) // Вопросы атомной науки и техники. Серия "Физика ядерных реакторов"<sup>[36]</sup>, № 2, 2008 г., – с. 105-116

51. Можаяев А. С. Теоретические основы общего логико-вероятностного метода автоматизированного моделирования систем / А. С. Можаяев, В. Н. Громов. – СПб.: ВИТУ<sup>[1]</sup>, 2000. – 145 с.

52. <sup>[16]</sup>Можаяев А. С. Универсальный графоаналитический метод, алгоритм и программный модуль построения монотонных и немонотонных логических функций работоспособности систем // Моделирование и Анализ Безопасности и Риска: труды третьей международной научной школы МАБР – 2003 (РФ, СПб, 20–23августа 2003 г.). – СПб.: СПбГУАП<sup>[1]</sup>

, 2003. – с. 101–110

53. Мусаев А.А., Гладкова И.А. Современное состояние и направления развития общего логико-вероятностного метода анализа систем // Труды СПИИРАН, 2010, выпуск 1(12), – с. 75-97

54. Новые методы управления сложными системами = New control methods of complicated systems : [сб. ст.] / Рос. акад. наук, Отд-ние информ. технологий и вычисл. систем; [отв. ред. д.т.н., проф. В.М. Лохин]. - М.: Наука, 2004. – 333 с.

55. Овчинников М.Ю., Иванов Д.С., Ролдугин Д.С., Ткачёв С.С., Карпенко С.О. Разработка рекомендаций по управлению ориентацией микроспутника «Чибис-М» в случае отказа части исполнительных органов // Механика, управление и информатика (ИКИ РАН), №1(13), 2013, – с. 132-145

56. Основы теории полёта космических аппаратов / под. ред. Г.С. Нариманова и М.К. Тихонравова. – М.: Машиностроение, 1972. – 608 с. 149

57.

Охтилев М.Ю. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов / М. Ю. Охтилев, Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.

58. Павлов А.Н., <sup>[1]</sup>Зеленцов В.А., Кулаков А.Ю. Структурная реконфигурация сложных объектов // <sup>[17]</sup>

Журнал «Труды международного симпозиума надёжность и качество». – Пенза: ПГУ, 2012, с. 146-148 59.

Павлов А.Н. Исследование генома двухполюсной сетевой структуры // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: труды IX Международной научной школы МАБР–2009 (РФ, Санкт–Петербург, 7–11 июля 2009 г.). – СПб.: ГУАП<sup>[1]</sup>, 2009. – С. 429–434

60. <sup>[8]</sup>Павлов А.Н. Комплексное моделирование структурнофункциональной реконфигурации сложных объектов // "<sup>[1]</sup>

Труды СПИИРАН", выпуск №5(28), 2013. – с. 143-168 61.

Павлов А.Н., Кулаков А.Ю., Войтович А.В., <sup>[1]</sup>Способ формализованного <sup>[17]</sup>анализа структур сложных объектов // <sup>[1]</sup>Материалы конференции «<sup>[17]</sup>Информационные технологии в управлении», 2012 – <sup>[2]</sup> СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2012. – с. 317-320

62. <sup>[17]</sup>Павлов А.Н., Панькин А.В., Кулаков А.Ю. Об оценках структурной устойчивости монотонной системы // <sup>[1]</sup>Кибернетика и высокие технологии: материалы XIII междунар. науч.-техн. конф. 15-17 <sup>[52]</sup>

мая 2012. – Воронеж: 2012. – с. 22-31 63.

Павлов А.Н. Моделирование, оценивание и анализ сценариев деградации и восстановления структурных состояний катастрофоустойчивой информационной системы / А. Н. Павлов, Б. В. Соколов // Кибернетика и высокие технологии XXI века: тез. докладов X Международной научно–технической конференции (РФ, Воронеж, 13-14 мая 2009 г.). – Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ», 2009. – с. 183-190

150

64. Павлов А.Н., [1]

Соколов Б.В. Структурный анализ катастрофоустойчивых информационных система // Труды СПИИРАН, вып.8, 2009. – с. 128-153

65.

Павлов А.Н., Соколов Б.В., Иванов Д.И., Кулаков А.Ю, Динамическая модель управляемой реконфигурации дистрибуционной сети цепи поставок // Логистика: современные тенденции развития: материалы XI [1]Междунар. науч.-практ. конф. 19-20 [17]апреля 2012г. – СПб.: СПбГИЭУ, 2012. – с. 249-252

66. [3]Павлов А.Н. Структурная динамика катастрофоустойчивой информационной системы / А. Н. Павлов, Б. В. Соколов // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: труды IX Международной научной школы МАБР-2009 (РФ, СанктПетербург, 7–11 июля 2009 г.). – СПб.: ГУАП [1], 2009. – С. 85-93

67. Палкин М.В., Петухов Р.А. Управление угловым движением малого космического аппарата // Наука и образование: науч. изд. МГТУ им. Баумана, №10, 2013. – 193-204

68. Пападимитриу Х., Стайглиц К. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность / Изд. Мир, М.: 1984 – с. 512

69.

Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства: монография, научное издание / В. И. Поленин, И. А. Рябинин, С. К. Свирин, И. А. Гладкова; под ред. А. С. Можяева. – СПб.: СПб-региональное отделение РАЕН [1], 2011. – 416 с.

70. Программирование в С++ Builder 6, А♦♦хангельский А.Я. – М.: «Издательство БИНОМ», 2003. – 1152 с.

71. Попов В.К.,

Блукке В.П., Дворкин А.Б. Модели анализа устойчивости и живучести информационных сетей // Проблемы информатики [39]

, 2009, №4, – с. 63-78.

151

72. Попов В.И. Системы ориентации и стабилизации космических аппаратов. Пассивные и комбинир. системы / М. : Машиностроение, 1986. – 183 с.

73.

Растринг, Л. А. Адаптация сложных систем / Л. А. Растринг. – Рига: Зинанте [1]

, 1981. – 375 с.

74. Рябинин И.А. Надежность технических систем. Принципы и анализ. – М.: Мир, 1976.

75. Савкин Л.В. Построение встроенной системы функционального контроля и диагностики бортового комплекса управления космического аппарата на базе реконфигурируемых вычислительных средств // Инновации в науке, НП "СибАК" (Новосибирск), №38, 2014 г. – с. 83-90

76.

Савкин Л.В., Ключко О.С, Макаров А.С. Реализация алгоритмов распознавания сложных видов неисправностей и отказов бортовой аппаратуры космических аппаратов на основе встроенных реконфигурируемых диагностических систем // Universum: Технические науки, №11, 2014, – 4 [37]

стр.

77. Сворцов М. С. Метод оптимизации надёжности структурно-сложных технических систем на стадии проектирования: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.01 / Сворцова Михаила Сергеевича. – СПб., 2011. – 123 с.

78. Серпухов А.А., Седельников А.В. Использование электроракетных двигателей для управления движением космической лаборатории // Актуальные проблемы авиации и космонавтики, Т. 1, №6, 2010 – с. 334-335

79. Система управления полётом космических аппаратов / Г.Г. Бебенин, Б.С. Скребушеский, Г.А. Соколов. – М.:

Машиностроение, 1978. – 272

с.

80. [14] Соколов Б.В. Комплексное планирование операций и управление структурами в АСУ активными подвижными объектами. – СПб.: МО, 1992. – 232 с.

152

81. Соколов Б.В. Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов / Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов //

Изд. РАН. Теория и системы управления [1]

. – 2004. – №6. – С. 5–16

82. Тарасов А. А. Стратегии функциональной перестройки отказоустойчивых информационных систем при различных видах деградации // Безопасность информационных технологий, № 2, 2012. – с. 22-31

83. Теория систем с переменной структурой / Под ред. С.В. Емельянова. - Москва : Наука, 1970. - 592 с.

84. Уколов И. С., Бек В. В., Махлин А. Р. Интегрированные системы активного управления. Методы алгоритмической интеграции / Под ред. акад. Р. А. Белякова. – М.: Наука, 1986. – 180 с.

85.

Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса управления : учебник / Ю.С. Мануйлов, В.Н. Калинин, В.С.

Гончаревский, Е.А. [1] Новиков, И.И. Делий, под общ. ред. Ю.С.

[2]

Мануйлов. – СПб.: ВКА им. Можайского, 2010. – 513 с.

86. Управление ориентацией космических аппаратов / Б.В. Раушенбах, Е.Н. Токарь, 1974 – М.: Наука, 600 с.

87. Филимонов Н. Б. Системы многорежимного регулирования: концепция, принципы построения, проблемы синтеза // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. – 1988. – Т. 31, №2. – с. 18-33.

88. Ходенко В.П., Хромов А.В. Корректирующие двигательные установки для малого космического аппарата // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ, т. 109, №2, 2009. – с. 27-32

89. Шереметьев А.Г. Волоконный оптический гироскоп. – М.: Радио и связь, 1987. – с. 152.

90.

Briley B., Reliability Polynomial Forensics / B. Briley // Motorola GSG Technology Journal . – 2005.